

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Stavba a konfigurace wi-fi sítě z hlediska antén a šíření
Návrh antény technologie 3 x 3

Disertační práce

Student: Ing. Lukáš Wežranowski
Obor DSP: 2601V018 Komunikační technologie
Školitel: doc. Ing. Ivánek Lubomír, CSc.

Ostrava 2016

Prohlášení:

„Prohlašuji, že jsem tuto disertační práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

30.11.2016

Ing. Lukáš Wežranowski

Abstrakt

Práce se zabývá optimalizačními metodami při návrhu flíčkové antény. Hledáme optimální polohu prvků z hlediska vlivu na parametr S_{11} a průsak signálu z jednoho prvku do prvku sousedního. Při vypracování jsou použity metody optimalizace s ohledem na dosažení nejlepšího výsledku použitím programu Comsol Multiphysics.

Klíčová slova

Bezdrátová síť, Comsol Multiphysics, Coordinate search, Flíčková anténa, IEEE 802.11n, MIMO, Monte Carlo, Nelder-Mead, optimalizace, S_{11} , WiFi.

Abstract

The work deals with optimization methods for the design patch antenna. We are looking for the optimum position of the elements in terms of impact on parameter S_{11} and leakage of signal from one element to the adjacent element. When developing the use of different optimization methods with a view to achieving the best result using COMSOL Multiphysics.

Keywords

Antenna, Comsol Multiphysics, Coordinate search, IEEE 802.11n, MIMO, Monte Carlo, Nelder-Mead, optimalization, S_{11} , WiFi, wireless network.

Obsah

1.	Úvod	11
1.1.	Příklady technologií bezdrátových sítí v kmitočtovém pásmu 5-6 GHz	14
1.2.	Předpokládané směry vývoje konstrukce zařízení.	15
1.3.	Legislativní rámec provozu zařízení.	16
2.	Prostředky pro návrh antény – program COMSOL	17
2.1.	Základní popis programu	17
2.2.	Metody a možnosti optimalizace programem COMSOL	17
2.3.	Rozměrová, tvarová a topologická optimalizace	19
2.3.1.	Metoda Monte Carlo	20
2.3.2.	BOBYQUA.....	21
2.3.3.	Nelder-Mead	22
2.3.4.	Metoda Coordinate search	24
3.	Cíle disertační práce	26
4.	Návrh flíčku.....	27
4.1.	Obecný návrh tvaru RF struktury.	28
4.2.	Návrh flíčku pro substrát FR4	30
4.3.	Návrh tvaru v programu COMSOL MULTIPHYSICS	33
4.4.	Elektromagnetická vlna, Frekvenční doména, nastavení.....	35
4.5.	Výsledky – komentář ke stavu simulace versus ruční výpočet rozměrů.	36
5.	Optimalizace.....	41
5.1.	Schéma postupu optimalizace.....	41
5.2.	Stanovení omezujících podmínek optimalizace.	42
5.2.1.	Penalty	42
5.2.2.	Lagrangeova metoda, rozšířený Lagrangin.....	42
5.2.3.	Fyzická omezení daná výrobními možnostmi	45
5.3.	Optimalizace jednoho flíčku	45
5.3.1.	Optimalizace vstupního napájecího portu.....	47
5.3.2.	Výpočet pro rozsah frekvencí	49
5.4.	Vytvoření druhého flíčku.....	51
5.5.	Optimalizace na nejlepší parametry celkové vyzářené energie.	53
5.6.	Návrh a rozložení prvků pro uspořádání 3x3.....	55
5.7.	Optimalizace vzájemné polohy pro uspořádání 3x3	56
5.8.	Seskupení flíčků do funkčního celku.	59
5.8.1.	Zvětšení počtu prvků pro dosažení zisku 12 dB	60
5.8.2.	Kompenzace přizpůsobení systému antén	62

5.9.	Přizpůsobení napájecího vedení.....	65
5.10.	Vložení vzduchové mezery mezi flíčky a zemnicí plochu.....	65
5.11.	Simulace v CST studiu.....	67
5.12.	Optimalizace umístění druhého bloku.....	69
5.13.	Konfigurace 3x3	71
5.14.	Závislost průsaku na natočení	73
6.	Praktická realizace	76
6.1.	Měření činitele odrazu vyrobené antény.....	77
6.2.	Zisk antény.....	77
6.3.	Směrová charakteristika vyrobené antény	79
6.4.	Průsaky signálu do sousedních flíčků	80
7.	Vliv substrátu na vlastnosti antény	84
8.	Měření vlivu teploty na S11	85
9.	Závěr.....	86
10.	Literatura	88
11.	Publikační činnost	91
12.	Přílohy	93
12.1.	Příloha č. 1 tabulka hodnot funkce na sondě flíčku 2	93
12.2.	Příloha č. 2 tabulka hodnot funkce na druhé sondě.....	94
12.3.	Příloha č. 3 tabulka závislosti hodnot sondy na portu 2 a 3 na frekvenci	95
12.4.	FR-4 katalogové údaje	99
13.	Curriculum Vitae	100

Seznam obrázků

Obrázek 1 Odražený signál pro vertikální polarizaci antény (vlastní měření)	12
Obrázek 2 Odražený signál polarizaci potočenou o -45° (vlastní měření)	13
Obrázek 3 Základní rozdělení optimalizačních metod [7] v programu COMSOL.	20
Obrázek 4 Obecný tvar flíčkové antény, převzato z [17]	28
Obrázek 5 Náhradní schéma antény a napáječe [19] str. 815	28
Obrázek 6 Základní tvar - proměnné	34
Obrázek 7 Detailní pohled na navržený MESH	36
Obrázek 8 Neoptimalizovaná anténa	37
Obrázek 9 Vyzařovací diagram v rovině E	38
Obrázek 10 Neoptimalizovaný návrh ve 3D	38
Obrázek 11 Závislost impedance napájecího portu na frekvenci reálná složka	39
Obrázek 12 Závislost S_{11} na frekvenci u nepřizpůsobené antény	39
Obrázek 13 Schéma optimalizačního procesu	41
Obrázek 14 Průběh konvergence výpočtu optimalizace v rozsahu frekvencí	44
Obrázek 15 Znázornění kvadratické penalty [26]	44
Obrázek 16 Definice bodů pro výpočet vzdáleného pole	46
Obrázek 17 Průběh iterací optimalizačního procesu	47
Obrázek 18 Rozložení pole a zobrazení zisku antény po první optimalizaci	48
Obrázek 19 Průběh zisku a S_{11} v závislosti na frekvenci po optimalizaci napájecího vedení ..	49
Obrázek 20 Vyzařovací diagram po optimalizaci napájecího vedení	50
Obrázek 21 Vypočítané hodnoty S_{11} a impedance Z_1 napájecího portu v závislosti na frekvenci	50
Obrázek 22 Jeden patch před a po optimalizaci	51
Obrázek 23 Uspořádání prvků a MESH pro výpočet uspořádání 2x2 po optimalizaci	52
Obrázek 24 Zobrazení rozložení pole	53
Obrázek 25 Směrová charakteristika 2x2	53
Obrázek 26 Závislost průsaku do druhého flíčku a vzdálenosti prvků	54
Obrázek 27 Impedance napájecího portu, zisk a S_{11} v širším okolí	54
Obrázek 28 Neoptimalizované rozvržení flíčků	55
Obrázek 29 Uspořádání 3x3 optimalizovaný pro MAX	56
Obrázek 30 Uspořádání 3x3, optimalizace pro minimalizace hodnot na sondě	57
Obrázek 31 Závislost napětí na sondě na vzdálenosti flíčků	58
Obrázek 32 Závislost průsaku napětí na sondách na frekvenci pro oba flíčky.	58
Obrázek 33 Sériové řazení flíčků [19]	59
Obrázek 34 Spolupracující řazení flíčků paralelní [19]	59
Obrázek 35 Závislost vzdálenosti prvků a zisku soustavy flíčků	60
Obrázek 36 Paralelní řazení 2 flíčků	60
Obrázek 37 Rozložení prvků	61
Obrázek 38 Výsledné řazení prvků	61
Obrázek 39 Návrh přizpůsobovacích členů dle [32]	62
Obrázek 40 Možnosti řešení napájení a přizpůsobení antény [33]	62
Obrázek 41 Finální design antény pro jednu polarizaci po kompenzacích	63
Obrázek 42 Simulace S_{11} v závislosti na frekvenci	64
Obrázek 43 Simulace zisku antény v závislosti na frekvenci	64
Obrázek 44 Průběh impedance napájecího portu, podrobný popis v textu	65
Obrázek 45 Směrová charakteristika antény	66
Obrázek 46 Přizpůsobení finálního designu antény	66

Obrázek 47 Směrová charakteristika v CST Studiu	67
Obrázek 48 Rozložení intenzity elektrického pole v CST Studiu	68
Obrázek 49 Parametry S11 v CST Studiu	68
Obrázek 50 Vliv vzdálenosti antén na parametr S_{11}	69
Obrázek 51 Rozmístění prvků po optimalizaci dle S_{11}	69
Obrázek 52 Vliv vzdálenosti prvků na průsak signálu do sousedního systému	70
Obrázek 53 Natočení druhého flíčku o 45°	70
Obrázek 54 Vyzařovací diagram 3x3 ve 3D	71
Obrázek 55 Rozložení intenzity el. pole na flíčcích 3xV	72
Obrázek 56 Závislost průsaku do vedlejšího flíčku na vzájemné vzdálenosti prvků	73
Obrázek 57 Optimalizované polohy	73
Obrázek 58 Simulace rozložení intenzity pro natočený model 3x3	74
Obrázek 59 Výsledný design	76
Obrázek 60 Vyrobená anténa	76
Obrázek 61 Přizpůsobení vyrobené antény na analyzátoru	77
Obrázek 62 Zisk antény	78
Obrázek 63 Potlačení signálu při opačné polarizaci	78
Obrázek 64 Měření v bezodrazové komoře VUS	79
Obrázek 65 Vyzařovací charakteristika antény změřená	80
Obrázek 66 Průsak signálu pro uspořádání 3xV	81
Obrázek 67 Průsak signálu pro uspořádání V+H+V	82
Obrázek 68 Průsak signálu pro uspořádání V+ 45° - 45°	83
Obrázek 69 Frekvenční závislost průsaku signálu do sousedního flíčku	83
Obrázek 70 Závislost šířky flíčku na ϵ_r	84
Obrázek 71 Závislost šířky flíčku na tloušťce substrátu	84

Seznam tabulek

Tabulka 1 Vlastnosti substrátu FR4	30
Tabulka 2 Globální parametry pro geometrii modelu a simulace.	34
Tabulka 3 Vlastnosti substrátu FR4	35
Tabulka 4 Hodnoty před a po optimalizaci	49
Tabulka 5 Nejlepší dosažené přizpůsobení druhým flíčkem	53
Tabulka 6 Lokální minima funkce a hodnoty přizpůsobení.	54
Tabulka 7 Hodnoty před optimalizací	61
Tabulka 8 Proměnné pro finální optimalizaci	63
Tabulka 9 Finální parametry designu jedné polarizace	63
Tabulka 10 Závislost průsaku na vzdálenosti	72
Tabulka 11 Závislost průsaku na úhlu natočení	74
Tabulka 12 Průsak signálu do vedlejšího flíčku V+V+V	80
Tabulka 13 Naměřené hodnoty průsaku signálu pro uspořádání V+H+V	81
Tabulka 14 Naměřené hodnoty průsaku signálu pro uspořádání V+45-45	82
Tabulka 15 Naměřené hodnoty závislost S_{11} na teplotě	85

Seznam použitých symbolů a zkratk

BOBYQA	Bound Optimization BY Quadratic Approximation	metoda optimalizace BOBYQA
CAD	computer aided design	počítačem navrhované projektování
COBYLA	Constrained optimization by linear approximation	metoda optimalizace COBYLA
CPR	Cross-Polarization Ratio	úroveň signálu při křížové polarizaci
CPD	Cross Polarization Discrimination	potlačení signálu při křížové polarizaci
ČR	Czech Republic	Česká Republika
DSSS	Direct Sequence Spread Spectrum	systém rozprostřeného spektra s přímou sekvencí
e.i.r.p	equivalent isotropically radiated power	ekvivalentní izotropně vyzářený výkon
FHSS	Frequency Hopping Spread Spectrum	systém rozprostřeného spektra s přeskokem kmitočtu
GHz	GigaHertz	GigaHertz
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	instituce
ISP	internet service provider	poskytovatel připojení k internetu
LTE	Long term evolution	technologie pro vysokorychlostní internet
MMA	Method of Moving Asymptotes	metoda optimalizačního řešiče
MISO	multiple input single output	vícekanálový vstup, jednobanýlový výstup
MIMO	multiple input multiple output	vícekanálový vstup, vícekanálový výstup
OEM	Original Equipment Manufacturer	označení typu výrobce zařízení
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplex	ortogonální modulace s vícenásobným frekvenčním dělením
OS		Operační systém
POE	Power over ethernet	napájení přes ethernet
RB	Routerboard Mikrotik	Mikrotik routerboard – značka
RF	Radio frequency	vysokofrekvenční, rádiová frekvence
RSLL	Reduces Side-Lobe Level	potlačení bočních laloků oproti hlavnímu laloku
RSMA		Reversní SMA konektor
S_{11}		činitel zpětného odrazu signálu
SIMO	single input multiple output	jednobanýlový vstup, vícekanálový výstup
SNOPT	Sparse nonlinear optimizer	optimalizační algoritmus
SW	software	program
TDMA	Time division multiple access	metoda řízení přístupu stanic k vysílači na sdíleném kanále
UBNT	Ubiquiti networks, Inc	výrobce zařízení
VSWR	Voltage standing wave ratio, SWR	poměr stojatých vln
WB	wide band	širokopásmový rozsah
WiMax	Worldwide Interoperability for Microwave Access	technologie přenosu
WLAN	wireless local area network	bezdrátová síť

c	rychlost světla ve vakuu
D	výška substrátu
ε_{ef}	efektivní hodnota permitivity v substrátu
ε_r	relativní permitivita
f	optimalizační funkce
f_{m2}	optimalizační funkce pro vzdálené pole 2x2
f_{m3}	optimalizační funkce pro maximum pro vzdálené pole 3x3
f_{min}	minimální frekvence, dolní mez
f_{max}	maximální frekvence, horní mez
f_{max2}	optimalizační funkce pro maximum pro 2 anténní systémy
f_{min3}	optimalizační funkce pro minimum pro vzdálené pole 3x3
f_{minS11}	optimalizační funkce pro minimum S_{11}
f_r	pracovní frekvence
G	vodivost antény
k	vlnová konstanta
L_{patch}	délka flíčku
λ_d	délka vlny v substrátu
W_{patch}	šířka flíčku
w	šířka napájecího vedení
x_s	hloubka vnoření napájecího vedení do flíčku
Z	impedance antény
Z_0	impedance napájecího portu
Z_{in}	impedance flíčku bez napájecího vedení

1. ÚVOD

Bezdrátové sítě se v České republice (ČR) po bouřlivém rozvoji v letech 2006 - 2008 rozdělily na dva hlavní proudy podle použití. Vznikla a velmi se rozšířila specializovaná zařízení pro profesionální použití, u nichž došlo, zejména díky masové produkci, k výraznému snížení cen. Druhou vývojovou větev tvoří produkty určené pro domácí použití. Zde jsou výrobci tlačeni do co nejnižších cen, a proto je převážná většina zdokonalení prováděna na softwarové úrovni. V roce 2016 stoupá počet domácích zařízení disponujících technologií 802.11n a začíná nasazení technologie 802.11ac.

V profesionálním použití se rozšiřuje používání technologií podle standardu 802.11n a 802.11ac a to v konfiguraci 2x2 nebo výjimečně 3x3. U zařízení pro ISP je konfigurace 2x2 využívána poměrně často již cca 2 roky. V praxi však již dříve byly systémy 3x3 zkoušeny jako kombinace 3 nezávislých antén. Velkým problémem se ukázal nedostatek vhodného RF hardware – bezdrátových karet podporujících technologii 3x3. Díky tomu, že společnost, ve které pracuji, provádí distribuci produktů Cyberbajt v ČR, mám možnost v této práci porovnat výsledky mého návrhu s anténou GIGABRIDGE 19 dBi Intel Atom 3x3 MIMO. U technologie 3x3 se ukazuje velkým problémem vzájemné rušení. Při konfiguraci 2x2 je signál rozdělen polarizačně do horizontální a vertikální polarizace.

V disertační práci je navržena a optimalizována mikropásková anténa typu „fliček“. Ve tvarové optimalizaci této antény jsou sledované optimalizační parametry zisk ve vzdáleném poli a parametr S_{11} . Stupně volnosti neboli měněné parametry představují vždy dva rozměry antény. Takto optimalizovaná anténa dále tvoří jeden prvek anténního systému pro provoz 3 x 3 MIMO. Anténní systém je složen z 3 optimalizovaných antén a opět optimalizován s průsakem mezi anténami jako sledovaným parametrem. Anténa i celý systém byly modelovány a optimalizovány v programu COMSOL Multiphysics. Na závěr proběhla kontrolní simulace v programu CST studio.

Odstup signálu při více polarizačním uspořádání

Odstup signálu druhého nebo dalšího datového proudu při MIMO konfiguraci od prvního hraje důležitou roli při hodnocení přenosových vlastností antény. Zejména, pokud se jedná o kombinace umístěné na jednom substrátu nebo na jednom zářiči. Typické hodnoty pro parabolické antény jsou od -20 dB do -53 dB [1]. Pokud se jedná o umístění antén na substrátech, jsou hodnoty od -20 dB do -35 dB. Podrobně se simulací průsaku mezi dvěma fličky při konstantní vzdálenosti $0,13\lambda$ metodou IWO zabývá [2]. Problematikou zvětšení odstupu při současně dvojí polarizaci jednoho fličku se zabývá [3], kde dosahuje teoreticky hodnoty izolace až kolem -60 dB, avšak pouze na frekvenci 1GHz. Další zajímavou aplikací je čtyř polarizační anténa dle [4], kde dosahují izolace -30 dB. Samostatně jsem se věnoval měření odstupu již v roce 2010 v [55].

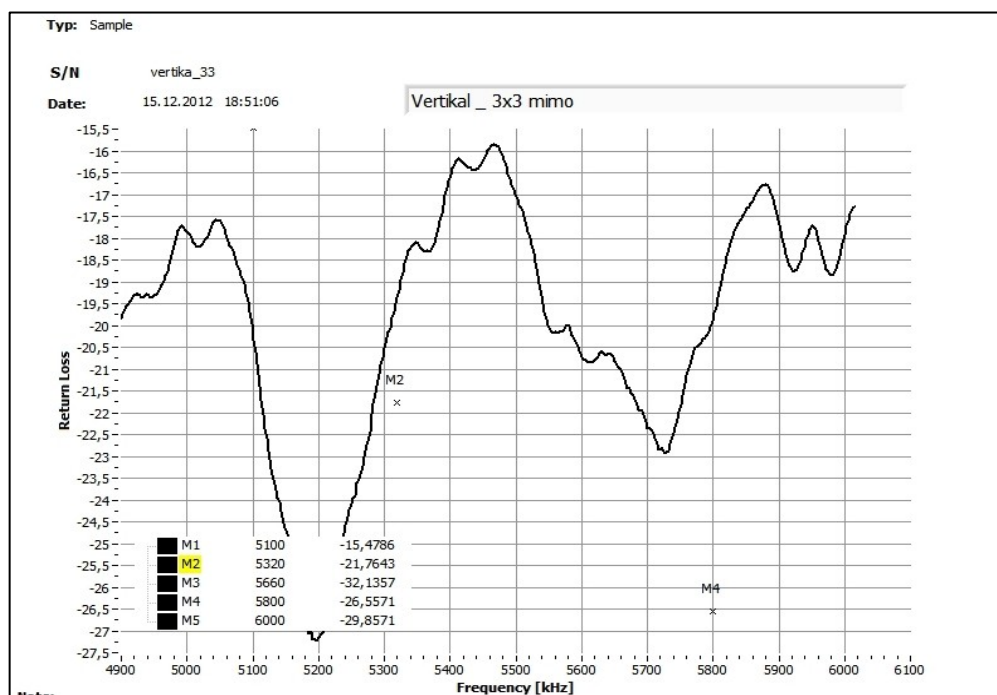
Analýza současného stavu - dostupné antény 3x3

V současné době je na trhu několik anténních systémů určených pro provoz MIMO 3x3. Uspořádání polarizací se liší podle jednotlivých výrobců od čistě vertikální polarizace až po různé verze natočení antén o $+45^\circ$ a -45° . Příkladem je třeba anténa firmy Cyberbajt, přes natočení o $\pm 45^\circ$ v kombinaci s horizontální nebo vertikální polarizací a nebo 0° , 45° , 90° , 135° , příkladem je třeba anténa TetraAnt 4x4/3x3 MIMO. Často je ve specifikacích výrobce pouze uvedeno, že se jedná o systém 3x3 s tím, že výrobce bližší uspořádání neuvádí.

Příkladem je WaveRF panelová anténa s boxem 3x3 MIMO, 16 dBi, 3x RSMA (5 GHz) či dále popsané kombinace OEM výrobců bez bližší specifikace - V&H&V prodávaná jako SECTOR-L_50018_3x3MIMO, nebo V&H&V prodávaná jako PRO-SECTOR-L_50018. Dalším důležitým parametrem je potlačení signálu mezi jednotlivými polarizacemi, tedy izolace mezi porty. Většina katalogů antén ji opět neuvádí, ale například TetraAnt 4x4/3x3 MIMO sektorová anténa 18 dBi (60°) má v katalogu hodnotu tohoto parametru lepší než 35 dB. Výpis z katalogů některých typů antén je uveden u konkrétního popisu. U antény Cyberbajt jsem provedl jako příklad vlastní orientační měření závislosti S_{11} na frekvenci.

Anténa Cyberbajt

Konstrukčně je řešená jako uzavřený box určený pro instalaci aktivního prvku dovnitř zařízení. Používá polarizační roviny vertikální a +45° a -45° nakloněnými od vertikální roviny. Změna polarizace se provede při instalaci pouze výměnou zapojení konektorů do karty. Pro maximální využití vlastností 3x3 se tyto antény používají v páru - levá + pravá. Anténa je dobře navržena, protože má hodnoty přizpůsobení v celém pracovním rozsahu lepší než -10 dB. Viz obrázky níže, které jsem získal vlastním měřením.

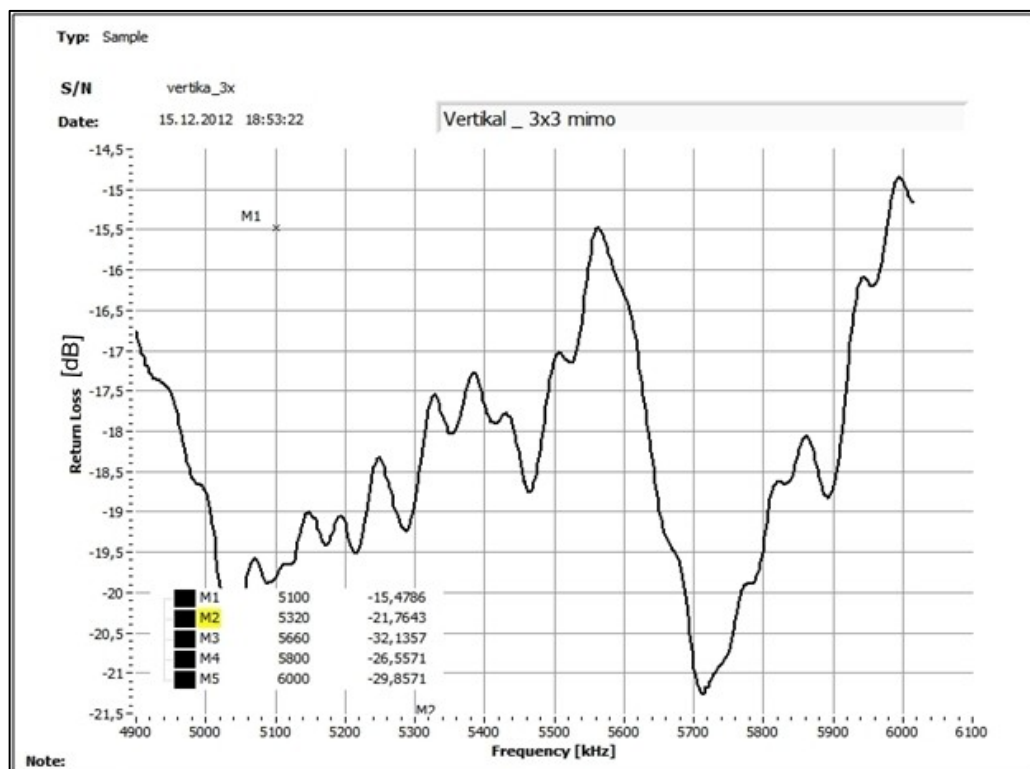


Obrázek 1 Odražený signál pro vertikální polarizaci antény (vlastní měření)

Vidíme, že anténa je velice dobře naladěna v rozsahu frekvencí 5,1 – 5,3GHz a zároveň v rozsahu frekvencí 5,5-6GHz. Z pohledu impedančního přizpůsobení lze tuto anténu prohlásit za velice zdařilou, protože vidíme hodnoty parametru S_{11} v celém měřeném rozsahu jsou vždy pod úrovní -15 dB.

Měření jsem prováděl na kompletním bloku antén bez zjišťování případného průsaku do sousedních prvků.

Důležitým parametrem antény je potlačení signálu mezi jednotlivými polarizacemi. Zde orientační měření potvrdilo průsak menší než 15 dB.



Obrázek 2 Odražený signál polarizaci pootočenou o -45° (vlastní měření)

Měření jsem prováděl pomocí generátoru signálu HP 8350B s RF jednotkou 2,4-8 GHz a pomocí skalárního analyzátoru HP8756A, sběr dat a zpracování pomocí SW Labview, USB redukce a potřebných kabelových redukcí. Měřící pracoviště jsem sestavil a kalibroval tak, abych při dalším zpracování snímal přímo měřené hodnoty, to znamená, že útlumy odbočnice jsou již zahrnuty do kompenzace signálové sestavy.

TetraAnt 4x4/3x3 MIMO sektorová anténa 18 dBi (60°)

Profesionální datová širokopásmová (5.1-6.1GHz) anténa pro 4x4/3x3 MIMO aplikace s provedením ET (electrical tilt). V případě TetraAnt 5_60_18_HVSLANT parametr CPR či CPD v celé šíři sektoru neklesá pod hodnotu 20 dB odstupu.

WaveRF Panelová anténa s boxem 3x3 MIMO, 16 dB, 3x RSMA (5 GHz)

Antény s boxem jsou určeny pro pásmo 5 GHz. Zisk každé antény je 16 dB. Komplet je vhodný pro použití s jednotkami podporující technologii 3x3 MIMO, např. Router Board RB953GS-5HnT.

SRA50019_3x3MIMO

Jedná se o anténu se ziskem 19 dB s vertikální a horizontální polarizací. Zahrnuje venkovní kryt proti vlivům počasí s panelem antény a dostatek prostoru pro router nebo jiné elektronické zařízení.

PRO-SECTOR-L_50018_3x3MIMO a SECTOR-L_50018_3x3MIMO

Anténa PRO-SECTOR-L_50018_3x3MIMO - ITeLite PRO-SECTOR-L_50018_3x3MIMO 5GHz 18dBi venkovní jednotka ve víceúčelovém krytu pracující v

pásmu 5 GHz s třemi nezávislými sektorovými anténami s 18 dB ziskem s vertikální, horizontální a vertikální polarizací.

SECTOR-L_50018_3x3MIMO

Sektorová SECTOR-L_50018_3x3MIMO 3x3 MiMO, anténa pracující v pásmu 5 GHz se 3 x 18 dB, se třemi polarizacemi pro aplikace 3x3 MIMO.

V komerčních nabídkách se vyskytují již i antény 4 x 4 MIMO například:

Anténa ANT5158D17C-VHXP

Jedná se o anténu typu Quad Polarization 4X4 MIMO pro rozsah frekvence 5.15-5.85GHz.

Zisk antény 17 dBi, polarizace V/H/ $\pm 45^\circ$, anténní port 4x, polarizace 4x4 MIMO (Vertikální, Horizontální a $\pm 45^\circ$)

1.1. Příklady technologií bezdrátových sítí v kmitočtovém pásmu 5-6 GHz

IEEE 802.11

Standart 802.11 byl vydán v roce 1999 a následně byl mnohokrát doplněn a rozšiřován dle technologických požadavků a směrů vývoje. V současnosti platná verze má označení IEEE Std 802.11-2012.

Standard 802.11b

Standard pro zařízení pracující v pásmu 2,4GHz, v němž je využíváno v ČR 13 vzájemně se překrývajících kanálů s maximální modulační rychlostí až 11Mbit s použitím modulace DSSS.

Standard 802.11g

Rozšíření výše popsaného standartu 802.11b zavedením pokročilejších modulací kupř. OFDM -*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*, ortogonální multiplex s kmitočtovým dělením umožňující dosahovat modulační rychlosti až 54Mbit. Podle výše uvedeného standartu byla na trhu zařízení, která umožňovala teoretickou modulační rychlost až 108Mbit v pásmu 2,4GHz. Toho dosahovala obsazením více kanálů. Zařízení s provozem se zdvojenými kanály nebyla homologována pro užití v ČR.

Standard 802.11a

Standart 802.11a je základní standart pro připojování bezdrátových stanic u ISP. Existuje několik rozšíření standartu s komerčním názvem nstream případně dual nstream vyvinutými a používanými s routerboardech Mikrotik. Technologie využívá TDMA. Jinou vývojovou větví TDMA vzájemně nekompatibilní vyvinula společnost Ubiquiti networks.

Standard 802.11n

Standart byl vyvinut jako rozšíření pro nejčastěji používané frekvence 2,4GHz a 5GHz. Využívá technologii vícenásobných vstupů a výstupů – Multiple Input Multiple Output – MIMO. Zjednodušenou verzí MIMO je SIMO nebo MISO, běžně používané u domácích zařízení.

Standart 802.11ac

Standart byl schválen v roce 2014 a umožňuje teoretickou datovou propustnost až 1Gbps. Toho je dosaženo pomocí vyšší modulace – až 256QAM a větší šířkou kanálů – až 160MHz. V současné době se jedná o standard, který prochází největším rozvojem.

Příklady dalších technologií

Sítě 4 generace

Sítě postavené na tzv. Blanchet technologii, kdy je používáno v jedné infrastruktuře jedné frekvence pro obsluhu všech klientů. Zatím není příliš rozšířená vzhledem k vysoké finanční náročnosti. Částečně ji využívá společnost UBNT u svých spojů v pásmu 24GHz, kde dochází k synchronizaci spojů pracujících na jednom kanále na jednom místě.

LTE

Long term evolution, předpokládá se dosahování maximálních rychlostí až 172,8 Mbps pro downlink a odesílání (uplink) až 57,6 Mbps. Technologie bývá označována jako 4G a je běžně nasazována telekomunikačními operátory.

WiMax

Worldwide Interoperability for Microwave Access je stále se vyvíjející bezdrátovou technologií. WiMAX je definován v řadě norem IEEE 802.16 a jeho mezinárodní pracovní frekvence se předpokládají 2,4GHz, 3,5GHz, 5,725-5,825GHz a v pásmu 10,5GHz. Další pásma 2,5 – 2,7GHz jsou určena pro Ameriku. V České republice provozuje technologii WiMax v pásmu 3,5GHz společnost České Radiokomunikace. Vzhledem k vysoké pořizovací ceně však nepředpokládám žádné další rozšíření této technologie v běžném prostředí.

1.2. Předpokládané směry vývoje konstrukce zařízení.

Trendy výrobců se přizpůsobují dvěma naprosto odlišným cílovým skupinám. Proto jsem považoval za důležité zmínit každou skupinu zvlášť.

Koncoví uživatelé a jejich trendy

Domácí koncoví uživatelé kladou důraz především na co nejlepší pokrytí svého relativně malého prostoru s co nejvyšší dosahovanou rychlostí. Nejčastěji jsou v zařízeních proto používány všesměrové antény o zisku 2-8 dB s kulovou charakteristikou. Koncoví uživatelé mobilní – jedná se o zcela novou cílovou skupinu (typické zastoupení představují uživatelé s tablety), která se však vyznačuje obrovským nárůstem, zase preferují co největší mobilitu svých zařízení, ale výsledná skutečně dosahovaná rychlost pro ně není podstatná. Tito uživatelé jsou ochotni vyměnit dostupnost za rychlost. Obě skupiny koncových uživatelů jsou ochotné akceptovat vyšší cenu zařízení bez výrazného nárůstu užitečných vlastností pouze na základě vhodně zvoleného marketingu.

Profesionální uživatelé a jejich trendy

Profesionální uživatelé požadují co nejvyšší spolehlivost zařízení a stabilitu provozu. Zajímavým úkazem je orientace na cenu. Protože jde o prostředky sloužící k dosahování zisku, profesionální uživatelé jsou většinou silně orientováni na poměr ceny a výkonu. Na rozdíl od domácích uživatelů nejsou ochotni obětovat část spolehlivosti na úkor ceny. Vysoká cena je podle mého názoru důvodem, proč se více nerozšířila technologie WiMax v České

Republice. Výhodou byla možnost instalace klientů i bez přímé viditelnosti, avšak cenový skok oproti běžně využívané technologii byl tak vysoký, že ISP raději vybudovali retranslační body za použití mnohem levnější technologie.

1.3. Legislativní rámec provozu zařízení.

Provoz zařízení v pásmu označovaném jako 5GHz. Někdy bývá používáno označení pásma jako 5,3 GHz nebo 5GHz případně 5-6GHz, avšak vždy máme na mysli volné pásmo podle všeobecného oprávnění č. VO-R/10/05.2014-3 a č. VO-R/12/09.2010-12 k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení krátkého dosahu [5]. Případně jde o pásma dle všeobecného oprávnění k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení pro širokopásmový přenos dat v pásmech 2,4 GHz až 66 GHz [6]. Konkrétně frekvence 5150-5250 MHz a 5250-5350 MHz jsou určeny pouze pro užití uvnitř budovy a frekvence 5470-5725 MHz jsou omezené pouze 1 W střední hodnoty e.i.r.p a nebo 50 mW/MHz (střední spektrální hustota v libovolném úseku širokém 1 MHz). Pro pásmo 5GHz není striktně určen typ použité polarizace. Na rozdíl od jiných frekvenčních pásem je možnost použít jakkoliv natočenou polarizační vlnu.

2. PROSTŘEDKY PRO NÁVRH ANTÉNY – PROGRAM COMSOL

Zadání této disertační práce vzniklo v době, kdy byly na Katedru elektrotechniky zakoupeny rozšiřující moduly programu COMSOL Multiphysics: RF module a Optimization module. Snahou katedry bylo zapojit studenty do práce na ověření činnosti těchto modulů. Proto byl software COMSOL zvolen školitelem jako stěžejní, přestože nyní máme na katedře přístupné komerční programy specializované na simulace antén a tedy uživatelsky jednodušší. Software COMSOL je například ve srovnání s CST StudioSuite složitější, je otevřen pro náročnější úkoly a nastavení optimalizace je ve srovnání obou simulačních programů obtížnější. Možnost zasahovat do nastavení procesu výpočtu je však větší.

2.1. Základní popis programu

COMSOL Multiphysics je nástroj určený k modelování a simulaci fyzikálních dějů a skládá se z jádra a celé řady nadstavbových modulů, které rozšiřují jeho možnosti. Program je určen k řešení úloh pomocí metody konečných prvků. Lze jej použít na libovolné simulace fyzikálních dějů, např. [43], [44], [45], [46], [49], a ostatní publikace týkající se drážních těles. Vlastní rovnice mohou být ve formě PDE – parciální diferenciální rovnice nebo ODE – obyčejné diferenciální rovnice. Vytvářený model může obsahovat několik oblastí nebo částí a každé z nich lze přiřadit vlastnost rozdílného prostředí nebo materiálu. Do připravené materiálové knihovny je možné přidávat další materiály nebo si uživatel může vytvořit knihovnu vlastní požadovanými vlastnostmi.

RF modul programu COMSOL

Rozhraní RF modul se používá k modelování elektromagnetických polí a vln pro vysokofrekvenční aplikace. To znamená, že se vztahuje na modelování zařízení, která jsou větší než přibližně 0,1 elektromagnetické vlnové délky. Může se použít k modelování mikro rozměrných zařízení nebo zařízení rozměrů lidské postavy, pracujících při frekvencích nad 10 MHz. Modul zahrnuje simulaci elektromagnetického pole a vlny v dvojrozměrných a trojrozměrných prostorách spolu s tradičním modelováním obvodů na bázi pasivních a aktivních prvků. Všechny modelovací přístupy jsou založeny na Maxwellových rovnicích nebo jejich odvozeninách. RF rozhraní pokrývají modelování elektromagnetických polí a vln v kmitočtové oblasti, časové doméně, oblasti vlastní frekvence a v modální analýze. Rovnice jsou řešeny metodou konečných prvků s numericky stabilními hranami prvků diskretizace v kombinaci s state-of-the-art algoritmy pro obnovu a řešení vzniklých řídkých soustav rovnic. RF simulace jsou často používány k získání S-parametrů, které charakterizují přenos a odraz signálu.

Přenos a odraz signálu je vyjádřen kvantitativně pomocí S-parametrů.

2.2. Metody a možnosti optimalizace programem COMSOL

Modul Optimalizace přidává rozhraní Optimization do seznamu rozhraní nastavení fyzikálních úloh, které máme k dispozici. Rozhraní lze nalézt v hlavním menu pod položkou Mathematics > Optimization and Sensitivity branch. Rozhraní Optimization zahrnuje širokou škálu funkcí pro definici optimalizačních problémů samostatně, nebo ve spojení s dalšími modely fyziky, kde přináší možnost definovat:

- globální cíle, včetně lokálních cílů

- globální omezení
- globální řídicí proměnné
- integrované cíle na všech úrovních geometrie: domény, hranice, okraje, a body
- integrovaná omezení na všech úrovních geometrie
- bodová omezení na všech úrovních geometrie
- řídicí proměnná pole na všech úrovních geometrie
- cíle sondy v doménách (cíl definován bodovým hodnocením výrazu)

Modul OPTIMIZATION je balíček - doplněk, který umožňuje řešit optimalizaci třemi kroky. Za prvé, můžeme definovat cílovou funkci, která popisuje náš systém. Za druhé, můžeme definovat sadu návrhových proměnných - vstupy do modelu, které chceme změnit. Za třetí, můžeme definovat sadu omezení, položit meze na své návrhové proměnné, nebo provozní podmínky, které musí být splněny.

Optimalizace spočívá v nalezení extrémů reálných funkcí, které popisují určitý reálný stav systému. Jedna z definic optimalizace říká, že jde o matematickou disciplínu, ve které hledáme minimum respektive maximum dané funkce $f(x)$ (také nazývaná účelová nebo kriteriální či optimalizační) na dané množině X . Účelová funkce je n -rozměrná reálná funkce reálných proměnných s označením $f(x_1, \dots, x_n)$. Množinou se rozumí oblast, pro kterou lze nalezené řešení považovat za korektní, eventuálně fyzikálně realizovatelné. V našem případě jde o tvarovou optimalizaci, to znamená o změny proměnných parametrů - převážně geometrických rozměrů za účelem dosažení optimálního stavu sledovaných parametrů. Těmito parametry jsou zisk antény, průsak signálu mezi jednotlivými prvky výsledné anténní řady, tj. mezi jednotlivými mikropáskovými anténami, umístěnými na jednom substrátu.

Přestože teoreticky můžeme definovat jakkoli obtížný optimalizační problém, ne vždy je možné nalézt metodu, která by problém beze zbytku vyřešila. Pokud se rozhodneme pro optimalizaci využít postupy, které jsou implementovány do komerčních výpočetních programů, je tento výběr limitován ještě výrazněji. V této práci byly využity optimalizační metody, které obsahuje modul optimalizace programu COMSOL.

Modul optimalizace zahrnuje dvě rozdílné optimalizační techniky Derivative-Free a Gradient-Based optimalizaci. Derivative-Free je užitečná, pokud je funkce účelová a omezení mohou být nespojité a nemají analytické derivace. Například, můžete chtít, aby se minimalizoval maximální potenciál v řešené části změnou rozměrů. Nicméně, jak rozměry plochy měníme, místo, kde se špičkový potenciál nachází, se může posunout z jednoho bodu do druhého. Taková cílová funkce je neanalytická a vyžaduje přímý přístup odvození bez derivací. V modulu Optimization jsou k dispozici čtyři takové metody: Bound Optimization podle kvadratické aproximace (BOBYQA), Nelder-Mead, koordinované vyhledávání, a metoda Monte Carlo.

Modul Optimalizace vypočte přibližný gradient vedoucí návrhové proměnné směrem k vylepšenému designu. Modul Optimalizace počítá přesnou analytickou derivaci cílových funkcí a omezení metodou SNOPT optimalizace, vyvinutou společností Philip E. Gill z University of California v San Diegu a pány Walterem Murrayem a Michaelem A. Saundersem ze Stanfordské univerzity ke zlepšení návrhových proměnných. Druhý algoritmus založený na gradientech je řešení pomocí Levenberg-Marquardt. Tento řešič lze použít, když cílová odpovídá typu funkce typu nejmenších čtverců, typicky pro odhad parametrů aplikaci proložení křivkou. Třetí metoda, metoda Moving asymptot (MMA), je

řešič optimalizace na bázi gradientů, který napsal profesor K. Svanberg na Royal Institute of Technology ve Stockholmu, Švédsko. Je navržen s myšlenkou optimalizace topologie. Tato metoda se nazývá v literatuře GCMMA a je k dispozici v optimalizačním modulu pod názvem MMA.

Výhodou této metody na bázi gradientu je, že může řešit problémy zahrnující stovky nebo dokonce tisíce konstrukčních proměnných s velmi malým zvýšením výpočetní náročnosti jakmile se počet návrhových proměnných zvyšuje. Metoda Adjungovaná (Adjoint method) současně počítá všechny analytické derivace, zatímco metoda bez derivace musí aproximovat jednotlivé derivace, a bude trvat delší dobu, pokud se počet návrhových proměnných zvyšuje. Metody založené na bázi gradientů mohou zahrnovat i složitější omezení funkce.

Výhoda metody bez derivace spočívá v její jednoduchosti. Nevyžaduje nalezení diferencovatelné účelové funkce, a vyžaduje tedy méně interakci s uživatelem. Nicméně, vzhledem k výpočetním nákladům, jsou metody bez derivací velmi atraktivní, když je počet konstrukčních proměnných přibližně 10 nebo méně. V praxi to zahrnuje širokou řadu praktických řešení optimalizačních problémů.

Parametrická optimalizace znamená možnost optimalizovat jakýkoliv skalární vstup do modelu, jako například průtoky a velikosti zátěže. Je to obvykle nejjednodušší druh optimalizace a lze řešit s jakoukoli technikou.

Odhad parametrů (Parameter Estimation) je složitější, a zahrnuje korelaci modelu v COMSOLu a výpočet experimentálních dat. Typické použití je s cílem použít model pro odhad vlastností použitého materiálu.

2.3. Rozměrová, tvarová a topologická optimalizace

Optimalizační metody mohou být dále klasifikovány podle typů proměnných, které jsou optimalizovány. Rozměrová, tvarová, a topologická optimalizace jsou řešeny v rámci modulu optimalizace, a každá má své vlastní místo v procesu návrhu.

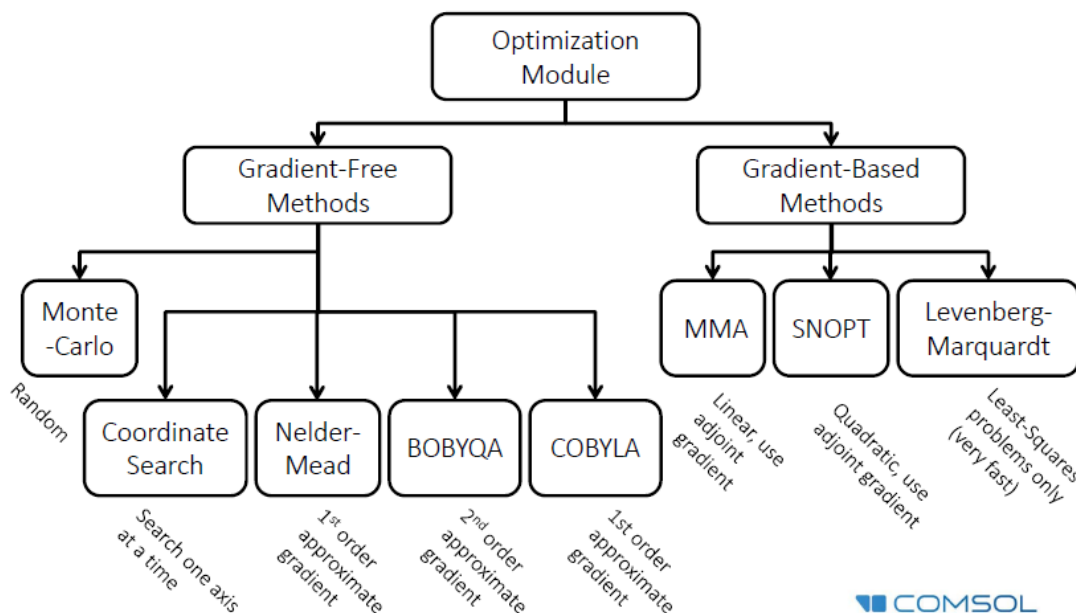
Rozměrová optimalizace zahrnuje definice návrhových proměnných, které mohou být přímo převedeny do výroby. Typické návrhové proměnné mohou být velikosti otvorů, délka, šířka nebo výška konstrukčních prvků. Rozměrová optimalizace se obvykle používá jako poslední krok v konstrukčním procesu a provádí se když je výsledný celkový tvar víceméně pevně stanoven. Obvykle se zde používá metoda bez derivace.

Tvarová optimalizace se obvykle používá v počátku procesu navrhování, a zahrnuje více volných změn tvaru objektu. Více péče je obvykle nutné věnovat výběru návrhových proměnných, protože cílem je zlepšit tvar, aniž by to nadměrně omezovalo design. Metodě na bázi gradientů se zde dává přednost v případě, když je k dispozici analytická cílová funkce.

Optimalizace topologie se používá ve velmi rané fázi návrhového procesu, typicky v koncepční fázi. Vzhledem k velkému počtu návrhových proměnných, je praktické použít pouze optimalizace na bázi gradientu.

V optimalizačních úlohách musíme rozlišovat úlohy bez omezení na definiční obor (volný extrém), omezení typu rovnost (klasický vázaný extrém) a omezení typu nerovnost (neklasický vázaný extrém). Různé optimalizační úlohy vyžadují různý matematický aparát a různé metody. Nejblíže ke klasické matematické analýze mají analytické metody, které využívají prostředky diferenciálního počtu a jsou vhodné zejména pro individuální výpočet bez využití speciálních numerických metod. Naproti tomu pro iterační metody se sestavuje

posloupnost bodů definičního oboru konvergující k extrému. Tyto metody nelze používat bez využití počítačů. Konečně existují i speciální úlohy, vyžadující specifické metody (lineární, dynamické, nelineární a jiné programování), které nazýváme pojmem operační analýza. Pro optimalizaci antén jsem v tomto případě použil metody, které dále popíši před vlastním výpočtem.



Obrázek 3 Základní rozdělení optimalizačních metod [7] v programu COMSOL.

Modul optimalizace zahrnuje 2 základní přístupy k řešení výpočtu optimalizace. Jedná se o metody bez derivace a metody založené na přírůstku. Metody bez derivace jsou výhodné pro použití v oblastech, kde předpokládáme nespojitost funkcí a nemají pevně stanovené hodnoty derivací – minim. Příkladem jsou minima napětí hledaná v závislosti na rozměrech. Se změnou rozměrů dochází ke změně umístění minim a maxim. Takovýto průběh vyžaduje použití metod Bound Optimization by Quadratic Approximation (BOBYQA), Nelder-Mead, COBYLA, Coordinate search a nebo metody Monte Carlo.

Comsol nabízí také využití gradientních algoritmů jako SNOPT, Levenberg-Marquardt, Method of Moving Asymptotes (MMA). Tyto metody nejsou pro naše použití vhodné, proto se jimi nebudeme dále zabývat.

2.3.1. Metoda Monte Carlo

U metody Monte Carlo jde o numerické řešení problémů pomocí několikrát opakovaných náhodných pokusů. Metoda Monte Carlo představuje širokou třídu výpočetních algoritmů, které vycházejí z opakovaného výběru náhodného souboru pro získání číselného výsledku. Často se používají pro fyzikální a matematické problémy především, když je obtížné nebo nemožné používat jiné matematické metody. Metody Monte Carlo se používají hlavně u tří různých problémových skupin: optimalizace, numerická integrace, a generování náhodných dat odvozených z rozdělení pravděpodobnosti u nelineárních problémů.

Monte Carlo metody se mezi sebou liší, ale mají tendenci sledovat určitý typický postup: Definují oblast možných vstupů. Při velkém počtu variant vygenerují variantu. Vytvoří náhodně vstupy přes oblasti z rozdělení pravděpodobnosti. Provedou deterministický výpočet na vstupech – několik simulačních běhů. Agregují výsledky. Srovnají výsledky – v případě, že jsou výsledky lepší než předešlé, jsou uloženy a varianta je označena jako nejvhodnější. Podobným postupem prozkoumává varianty až do okamžiku nalezení přijatelných výsledků. Při použití metody Monte Carlo je prvním a klíčovým krokem stanovení modelu, který popisuje zadaný problém. Je to krok velmi problematický, protože vzniklý model musí zahrnout co možná nej přesněji všechny aspekty (vstupy), které reálný problém určují nebo ovlivňují. Dalším krokem po stanovení modelu je generování náhodných a pseudonáhodných čísel. To znamená čísel, která se sice náhodná zdají být, ale generována jsou deterministickým algoritmem. Výhodou pseudonáhodných čísel je jednoduchost jejich získání pomocí numerických počítačových technik. Náhodná čísla daného modelu zjednodušují nalezení hodnot náhodné veličiny Y s náhodným rozdělením na intervalu $(0,1)$. Tyto náhodné veličiny potom transformujeme podle našich požadavků na požadované rozdělení. Funkční předpis, kterým můžeme transformaci provést může mít tvar

$$x_i = f(y_i, y_{i-1}, y_{i-2}, \dots, y_1) \quad (2.1)$$

Zde f je funkce získaná pomocí určitého algoritmu nebo vhodně zvolená. Výsledky se dále zpracují pomocí statistických metod. Velmi silná a velmi populární aplikace metody Monte Carlo v numerické simulaci s náhodnými čísly čísla je numerická optimalizace. Problém spočívá v minimalizaci (nebo maximalizaci) funkce nějakého vektoru, který často má velký počet dimenzí.

2.3.2. BOBYQUA

Bound Optimization by Quadratic Approximation [8], [9]. Optimalizace s použitím kvadratické aproximace - Bound Optimization by Quadratic Approximation (BOBYQA) – je nový algoritmus pro obecně neomezený optimalizační výpočet, který bere v úvahu zakřivení účelové funkce - vytvoří se kvadratické modely interpolace. Je to metoda, která má základ v aproximaci hladké unimodální účelové funkce $f(x)$ mnohočlenem druhého stupně – parabolou. K aproximaci dochází v okolí minima této funkce. Označíme-li hodnoty bodů účelové funkce $f(x)$ symboly $x_a < x_b < x_c$ a jím odpovídající funkce f_a, f_b a f_c , můžeme použít Lagrangeův interpolační mnohočlen ve tvaru [8]:

$$f_k(x) = f_a \frac{(x-x_b)(x-x_c)}{(x_a-x_b)(x_a-x_c)} + f_b \frac{(x-x_a)(x-x_c)}{(x_b-x_a)(x_b-x_c)} + f_c \frac{(x-x_a)(x-x_b)}{(x_c-x_a)(x_c-x_b)} \quad (2.2)$$

Potom bude mít aproximační kvadratická parabola $f_k(x)$ své ostré globální minimum ve stacionárním bodě x_k . Tento bod je jediným reálným kořenem rovnice

$$f'_k(x)|_{x=x_k} = 0 \quad (2.3)$$

to znamená

$$f_a \frac{2x_k - (x_b + x_c)}{(x_a - x_b)(x_a - x_c)} + f_b \frac{2x_k - (x_a + x_c)}{(x_b - x_a)(x_b - x_c)} + f_c \frac{2x_k - (x_a + x_b)}{(x_c - x_a)(x_c - x_b)} = 0 \quad (2.4)$$

Z této rovnice je

$$x_k = \frac{1}{2} \frac{(x_b^2 - x_c^2)f_a + (x_c^2 - x_a^2)f_b + (x_a^2 - x_b^2)f_c}{(x_b - x_c)f_a + (x_c - x_a)f_b + (x_a - x_b)f_c} \quad (2.5)$$

Jestliže jsou body x_a, x_b a x_c , od sebe stejně vzdálené, tj. jsou ekvidistantní

$$x_c - x_b = x_b - x_a = \Delta \quad (2.6)$$

zjednoduší se tato rovnice na tvar

$$x_k = x_b - \frac{\Delta}{2} \frac{f_c - f_a}{f_c - 2f_b + f_a} \quad (2.7)$$

U této metody je tedy obvyklý postup:

V k -té aproximaci se vypočte bod x_k a ten je dosazen do (a) místo jednoho z bodů x_a, x_b nebo x_c a vypočte se $k + 1$ aproximace x_{k+1} .

Při volbě bodů x_a, x_b a x_c se přihlíželo ke splnění podmínky (b) a vztahu

$$f_c - f_a \neq 0 \quad (2.8)$$

3. Bod x_k , který jsme vypočetli opět ze vztahu (c) dosadíme za bod x_b . Další body x_c a x_a vybereme tak, aby splňovaly podmínky (b) a (c), následně vypočteme další aproximaci x_{k+1} :

$$x_{k+1} = x_k - \frac{\Delta_k}{2} \frac{f_{ck} - f_{ak}}{f_{ck} - 2f_{bk} + f_{ak}} \quad (2.9)$$

přičemž v každém dalším kroku je rozdíl Δ_k menší.

Výpočet se ukončí, je-li splněna podmínka

$$|x_{k+1} - x_k| \leq \epsilon \quad (2.10)$$

výsledek má tvar

$$x \approx x_{k+1} \quad (2.11)$$

2.3.3. Nelder-Mead

Technika Nelder-Mead je metoda heuristického hledání, které může konvergovat k nestacionárním bodům. Je snadno ovladatelná, a používá se tak pro velkou třídu problémů. Metoda byla navržena John Nelderem & Roger Meadem v roce (1965), [10].

Tato metoda spočívá v úpravách podoby pravidelného vícerozměrného mnohoúhelníku (simplexu), jehož vrcholy jsou tvořeny kombinací optimalizovaných parametrů. Tyto úpravy se provádějí na základě hodnot optimalizačních kritérií zjištěných v jednotlivých vrcholech.

Simplexová metoda nepotřebuje výpočet derivací účelové funkce. Jako simplex je označován nejmenší konvexní polyedr v daném prostoru, což znamená, že v n dimenzionálním prostoru definujeme $n+1$ bodů. Ve dvou dimenzionálním je to tedy trojúhelník, v třírozměrném je to pravidelný čtyřstěn. Simplex je zjednodušeně zobecněním trojúhelníku do libovolného n -rozměrného prostoru, ale může se jednat o úsečku, trojúhelník

na rovině, čtyřstěn v trojrozměrném prostoru a tak dále. Obecně je to speciální typ polynomu s $n + 1$ vrcholy N rozměrů.

V R_n prostoru jsou body definovány [11] takto:

$$x = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_n \end{pmatrix}, \quad x_2 = \begin{pmatrix} a_1 + d + e \\ a_2 + d \\ \dots \\ a_n + d \end{pmatrix}, \dots, \quad x_{n+1} = \begin{pmatrix} a_1 + d \\ a_2 + d \\ \dots \\ a_n + d + e \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

Podstatou metody jsou pravidla, podle kterých se mění rozměry a orientace celého simplexu, a tím i hodnoty optimalizovaných parametrů. Celý proces má postupný (sekvenční) charakter. Příslušná změna vrcholu se provádí vždy na základě vyhodnocení úspěšnosti předchozích úprav. Metodu si popíšeme blíže.

Comsol nám nabízí 2 základní přístupy k optimalizaci, hledání minima nebo hledání maxima. Pak základní funkce pro hledání minima je :

$$\min f(x) \quad (2.13)$$

Výsledkem je geometrický obrazec s n rozměry, který tvoří konvexní obal s $n+1$ vrcholy.

$$f(x_1) \leq f(x_2) \leq \dots \leq f(x_{n+1}) \quad (2.14)$$

Kde x_1 je vrchol s nejlepší hodnotou a x_{n+1} je vrchol s nejhorší hodnotou. Pokud existují vrcholy se stejnou hodnotou, použije se metoda dle [12] pro upřesnění. Výpočetní algoritmus používá níže uvedené čtyři metody a jejich skalární koeficienty:

R – zrcadlení, koeficient $R = 1$

E – expanze, koeficient $E > 1$

K – vnější kontrakce, koeficient $0 < K < 1$

S – stažení, koeficient $0 < S < 1$

Vrcholy se seřadí podle funkční hodnoty dle (1.3) a provede se výpočet průměru ze všech bodů s výjimkou nejhoršího.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.15)$$

Obecný popis jednoho průchodu optimalizačním procesem dle [13], [14]. Provede se základní výpočet a třídění. Vypočte se funkce f pro $n+1$ vrcholů dle zadání výchozích hodnot pro výpočet v programu. Výchozí hodnoty určujeme dle vlastní úvahy a zkušeností s návrhem. Seřadíme hodnoty dle (1.3) a pokud splňujeme podmínky, je optimalizace vyřešena.

Zrcadlení. Vypočteme bod zrcadlení

$$x_r = x_m + R(x_m - x_{n+1}) \quad (2.16)$$

a vyhodnotíme $f(x_r)$. Je-li $f_l < f_r < f_n$ akceptuje se x_r , nahradíme x_{n+1} zjištěným x_r a iterace se ukončí.

Expanze. Pokud je $f_r < f_l$ vypočteme expanzní bod x_e pomocí

$$x_e = x_m + E(x_r - x_m) \quad (2.17)$$

a vypočteme hodnoty $f_e = f(x_e)$. Jestliže je $f_e < f_r$, nahradíme původní x_{n+1} novým x_e , jinak nahradíme x_{n+1} hodnotou x_r .

Vnější kontrakce. Pokud je $f_n \leq f_r < f_{n+1}$, vypočteme vnější bod kontrakce

$$x_{ek} = x_m + K(x_r - x_m) \quad (2.18)$$

A vypočteme funkční hodnoty $f_{ek} = f(x_{ek})$. Jestliže $f_{ek} \leq f_r$, nahradíme x_{n+1} pomocí x_{ek} , pokud podmínka není splněna, postupujeme k bodu 6.

Vnitřní kontrakce. Pokud je $f_r \geq f_{n+1}$, vypočteme vnitřní vrchol x_{ik} z podmínky

$$x_{ik} = x_m - K(x_r - x_m) \quad (2.19)$$

a vyhodnotíme $f_{ik} = f(x_{ik})$. Pokud je $f_{ik} < f_{n+1}$, nahradíme x_{n+1} hodnotou x_{ik} ; jinak pokračujeme následujícím bodem.

Stažení. Pro $2 \leq i \leq n+1$ definujeme vrchol stažení jako

$$x_i = x_l + S(x_i - x_l) \quad (2.20)$$

Po ukončení cyklu je provedeno seřazení výsledků dle bodu 1 a následně je optimalizace buď ukončena, nebo se opakuje až do nalezení požadovaných hodnot nebo vyčerpání maxima nastavených cyklů. Budeme používat optimalizaci rozměrů dle maximálního zisku antény a hledání optimálního rozměru napáječe dle minima S_{11} .

U optimalizací nám vždy hrozí nebezpečí uvíznutí výpočtu v lokálním extrému. Comsol nám dále nabízí možnost nastavení postupu práce v případě, že dojde k situaci, že dva vrcholy budou mít stejnou hodnotu.

2.3.4. Metoda Coordinate search

Tento algoritmus začíná s počátečním odhadem parametrů v prostoru, na kterém se skóre funkce vyhodnocuje. Na základě tohoto prostoru se spouští vyhledávání pro dosažení lepšího skóre než byl počáteční odhad. V rámci této metody vybere vyhledávací algoritmus jeden bod v každé ose parametru pro kontrolu lepší hodnoty skóre [15]. Odpovídající vzdálenost hledání od aktuální základny lze definovat v části optimalizace, kterou lze označit jako konfigurace. Je-li lepší hodnota skóre nalezena v určitém bodu během místního

prohledávání prostředí, zvolí se tento bod jako základní poloha pro další vyhledávání v oblasti prostředí. Pokud žádné lepší výsledky nejsou k dispozici v daném prostředí kolem aktuální základny umístění, je vzdálenost hledání pro algoritmus snížena o faktor definovaný uživatelem. Společná hodnota tohoto omezení je jedna polovina. Zjednodušeně řečeno, každá osa souřadnic je prohledána a sestup je veden pouze podél jednotkového vektoru. Metoda cyklického klesání souřadnic minimalizuje funkci $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ cyklicky s ohledem na souřadnice proměnných. To znamená, že nejprve se vyhledá x_1 , potom x_2 , atd. Možné jsou různé varianty. Metoda je obecně atraktivní, pro její snadnou implementaci. Její konvergenční vlastnosti jsou ale poměrně horší.

3. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

- 1 - Navrhnout planární (mikropáskovou) strukturu antény v pásmu 5,3-5,8GHz se ziskem alespoň 4 dB.
- 2 - Aplikovat optimalizační algoritmy na tuto anténu pro sledované parametry far field gain a parametr S_{11} , to vše se změnou dvou rozměrů antény v daném omezení
- 3 - Navrhnout vhodné uspořádání tří těchto antén ve funkčním bloku pro využití přenosové konfigurace 3x3 MIMO
- 4 - Optimalizovat vzájemné polohy antén tak, aby interference mezi anténami byla minimální
- 5 – Změření základních parametrů antény
- 6 – Vyhodnocení vlivu použitého substrátu na vlastnosti antény
- 7 – Změření vlivu teploty okolí na činitel odrazu antény

Vzhledem k požadavkům katedry na ověření RF modulu a modulu Optimization, jsou všechny cíle propojeny především s programem Comsol Multiphysics.

Disertabilní jádro práce spočívá v:

- a) výběru metody tvarové optimalizace antény typu „flíček“
- b) stanovení návrhových parametrů a jejich omezení
- c) optimalizace tvaru flíčku na zisk ve vzdáleném poli (far field gain)
- d) optimalizace tvaru flíčku na parametr s_{11}
- e) vhodné uspořádání tří antén typu „flíček“ na jeden substrát pro provoz 3 x 3 MIMO
- f) optimalizace polohy tří flíčků tj. vzájemné vzdálenosti tak, aby byl průsak signálů mezi jednotlivými kanály minimální

Vlastní práce se zabývá teoretickou a praktickou částí návrhu mikropáskové antény a zejména její optimalizací, spojením více flíčků do funkčního celku za účelem dosažení požadovaného zisku a následným měřením průsaků do sousedních flíčků. To vše na základě matematické simulace a optimalizace v programu Comsol Multiphysics.

Další kapitoly se věnují návrhu základního flíčku antény, jeho analytickému výpočtu dle dostupné literatury a popisu zvoleného substrátu. Popisují a hodnotím vhodnost jednotlivých optimalizačních metod pro použití k výpočtu RF parametrů, následně vybírám nejvhodnější metodu, se kterou provádím optimalizace prvku pro dosažení co nejlepšího přizpůsobení a zisku antény. Při výpočtech se zároveň zabývám nejvhodnějším umístěním jednotlivých prvků a jejich vzájemné interakci. Od strany 76 dále shrnuji informace získané měřením antény v bezodrazové komoře a v závěru hodnotím výsledek simulace a reálného měření.

4. NÁVRH FLÍČKU

Jak již bylo uvedeno výše, v době zadání této práce měla FEI k dispozici návrhový program COMSOL a zakoupila do něj moduly RF a Optimalizační modul. Cílem této práce bylo mimo jiné ověření možnosti využití modulu optimalizace pro návrh anténních systémů, aniž bychom museli provádět složité výpočty v programu Mathlab. V současné době je již k dispozici více nástrojů pro návrhy antén, zejména rozšířené CST studio, které je však jednostranně zaměřené a neumožňuje zasahovat do vlastních parametrů výpočtu optimalizace. Při zpracování této práce jsem pročetl řadu publikací a závěrečných prací, avšak v žádné jsem nenašel konkrétní řešení optimalizačních procesů v Comsol Multiphysics.

Návrh typu antény 3x3 lze považovat jako logické pokračování vývoje datových spojů podle 802.11a vzhledem k nastávající generační obměně technologií poskytovatelů internetového připojení a předpokládanému technologickému vývoji výrobce čipů a bezdrátových karet. Předpokládám, že dojde k výraznému nárůstu poptávky ze strany poskytovatelů po anténách technologie 3x3.

Materiály používané pro výrobu mikropáskových antén

Pro výrobu antén se běžně používá materiál FR4, který sice není primárně určen pro vysokofrekvenční aplikace tohoto typu, ale vzhledem k ceně je jeho použití i přes mírnou degeneraci parametrů akceptováno. Mezi další běžně dostupné materiály patří CEM1 a Gumon, případně méně dostupné AD250, AD600, DiClad, CuClad nebo IsoClad různého typového označení.

Návrh tvaru RF struktury

Mikropáskové vedení může být realizováno několika různými tvarovými prvky, čtverec, obdélník, trojúhelník, nebo jejich částmi dle jednotlivého návrhu podle požadavků na výsledek. Tvarem flíčku, tvarem okolních prvků a jejich umístěním lze výrazně ovlivnit vlastnosti antény – působení, směrovou charakteristiku, zisk.

Volba polarizačních rovin

Dvoupolarizační antény používají pro dosažení co nejlepších parametrů polarizační roviny na sebe vzájemně kolmé, u trojpolarizačních se situace mírně komplikuje. Naskytá se nám mnoho vzájemných kombinací [16].

Všechny antény používají stejnou polarizaci, to znamená, buď tři vertikální, nebo tři horizontální případně tři s polarizací signálu šikmou.

Antény používají kombinaci horizontálních a vertikálních možností. Teoreticky dvě horizontální a jedna vertikální případně naopak.

Antény používající kombinaci horizontální, vertikální a šikmé polarizace.

Antény používající kombinaci vertikální a dvou šikmých polarizací.

Antény používající kombinaci horizontální a dvou šikmých polarizací.

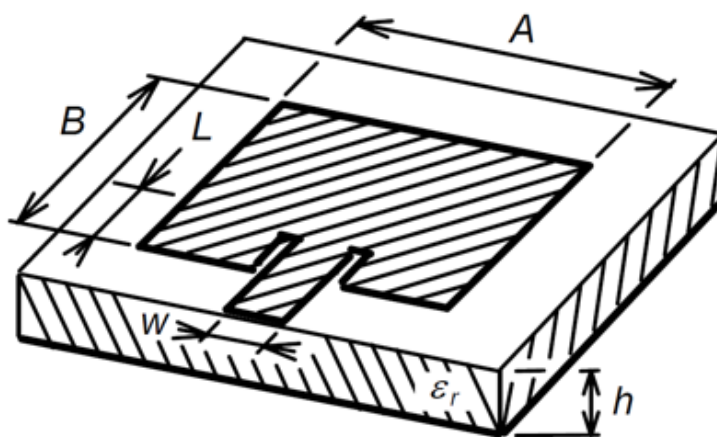
Pro praktické využití připadají z hlediska instalace jako nejvhodnější kombinace jednopolarizační bez ohledu na to zda jde o vertikální nebo horizontální polarizace. Výběrem lze eliminovat vliv šíření signálu v zástavbě nebo ve volném prostoru podle místa instalace. Podstatnou výhodou takového uspořádání antény je jednoduchost při montáži. Další vhodnou kombinací dle tohoto kritéria je použití vertikální a dvou šikmých polarizací, případně jedna horizontální a dvě šikmé. Pokud by byla zvolena kombinace horizontální plus vertikální a

jedna šikmá, antény by nebyly univerzální a pro montáž by bylo nutno párovat vždy dva kusy s opačnou šikmou polarizací. Tento nedostatek odstraňuje použití vertikální a dvou šikmých, vzájemně kolmých polarizačních rovin. Zajímavou možností řešení je využití polarizačních rovin vzájemně pootočených o 120° .

4.1. Obecný návrh tvaru RF struktury.

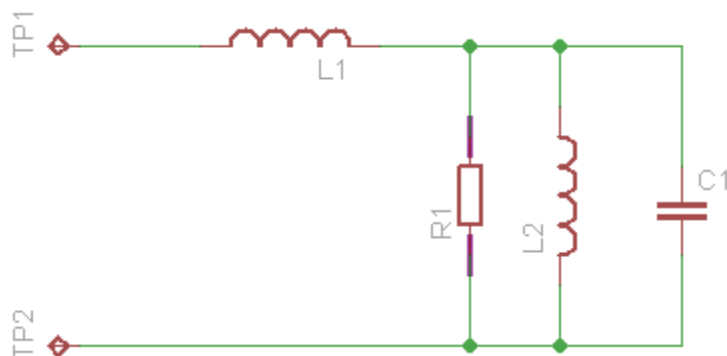
Základní návrh designu flíčku

Zvolil jsem flíčkovou anténu napájenou mikropáskovým vedením. Nejprve se budeme zabývat výpočtem a optimalizací jednoho flíčku, v další části pak řazením flíčků do soustavy tak, abychom dosáhli požadovaného zisku. Na obrázku 5 je obecný tvar flíčku se zapuštěným napájecím vedením.



Obrázek 4 Obecný tvar flíčkové antény, převzato z [17]

Volím vstupní impedanci jednoho flíčku 100Ω . Vzájemnou kombinací a použitím jednoho přizpůsobovacího vedení v oblasti napojení konektoru a optimalizací rozměrů spojovací příčky dosáhneme v případě řazení 4 flíčků výsledné impedance 50Ω . [18] Pokud použijeme pouze paralelní řazení 2 flíčků, bude výsledná hodnota impedance dvojice 50Ω .



Obrázek 5 Náhradní schéma antény a napáječe [19] str. 815

Náhradní schéma reprezentuje typické složení napáječe patch antény a vlastní antény. Využitím vzduchové mezery mezi flíčky na substrátu a zemnicí plochou dosáhneme větší šířky pásma. Dielektrické vlastnosti pak ovlivňují jak vlastnosti substrátu, tak vlastnosti

vzduchové mezery. Předpokládám práci antény v půlvlnné rezonanci [17]. Nejprve vypočítáme rozměry W_{patch} – šířka flíčku a L_{patch} – délka flíčku. Při výpočtu musíme zohlednit výšku flíčku D a fyzikální vlastnosti substrátu – permitivitu ϵ_r . Pro simulaci v programu COMSOL dále používáme přehlednější označení W_{patch} pro šířku a L_{patch} pro délku flíčku a D pro výšku substrátu. Níže uvedené vzorce a postup výpočtu jsou převzaty z [17].

Nejprve vypočítáme délku vlny v substrátu.

$$\lambda_d = \frac{c}{f_r * \sqrt{\epsilon_r}} \quad (4.1)$$

Následně šířku flíčku

$$W_{patch} = \sqrt{(h * \lambda_d) * \left[\ln\left(\frac{\lambda_d}{h}\right) - 1 \right]} \quad (4.2)$$

kde c značí rychlost světla ve vakuu, f_r frekvenci – pracovní kmitočet antény a ϵ_r relativní permitivitu substrátu. Konkrétní hodnoty pro výpočet jsou uvedeny v tabulce použitých symbolů, veličin a hodnot.

Výpočet efektivní hodnoty permitivity substrátu

$$e_{ef} = \frac{e_r + 1}{2} + \frac{e_r - 1}{2} * \frac{1}{\sqrt{1 + 12\left(\frac{h}{A}\right)}}, \text{ pro } \frac{A}{h} \geq 1 \quad (4.3)$$

Následně vypočítáme délku flíčku L_{patch} .

$$L_{patch} = \frac{c}{2f_r * \sqrt{e_{ef}}} \quad (4.4)$$

Kde c značí rychlost světla ve vakuu, f_r frekvenci a e_{ef} efektivní permitivitu substrátu.

Napájecí vedení flíčku

Flíčkovou anténu napájíme mikropáskovým vedením nebo napojením koaxiálním kabelem s typickou impedancí 50Ω . Vztahy pro výpočet pomocných proměnných pro určení šířky napájecího vedení a jeho vnoření do substrátu.

$$a = \frac{Z_0}{60} * \sqrt{\frac{e_r + 1}{2} + \frac{e_r - 1}{e_r + 1} * \left(0,23 + \frac{0,11}{e_r}\right)} \quad (4.5)$$

$$b = \frac{60 * \pi^2}{Z_0 * \sqrt{e_r}} \quad (4.6)$$

Z výše uvedených pomocných proměnných dopočteme hodnotu w – šířku napájecího mikropásku tak, aby mělo vedení požadovanou impedanci 100Ω .

$$\frac{w}{h} = \frac{8 \cdot \exp(a)}{\exp(2a) - 2}, \text{ pro } a > 1,52 \quad (4.7)$$

$$\frac{w}{h} = \frac{2}{\pi} * \left\{ b - 1 - \ln(2 * b - 1) + \frac{e_r - 1}{2 * e_r} * \left[\ln(b - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{e_r} \right] \right\}, \text{ pro } a \leq 1,52 \quad (4.8)$$

4.2. Návrh flíčku pro substrát FR4

Označení	Jednotka	Hodnota	Popis
c	m/s	$3 * 10^8$	rychlost ve vakuu
f_r	Hz	$5,6 * 10^9$	výpočtová frekvence
e_r		4,5	relativní permitivita

Tabulka 1 Vlastnosti substrátu FR4

Hodnoty jsou použity z [20].

Výpočet délky vlny v substrátu :

$$\lambda_d = \frac{c}{f_r * \sqrt{e_r}} = \frac{3 * 10^8}{5,6 * 10^9 * \sqrt{4,5}}$$

$$\frac{3 * 10^8}{5,6 * 10^9 * \sqrt{4,5}} = 25,25 \text{ mm}$$

Výpočet šířky flíčku (W_{patch})

$$W_{\text{patch}} = \sqrt{h * \lambda_d} * \left[\ln\left(\frac{\lambda_d}{h}\right) - 1 \right] = \sqrt{(1,5 * 10^{-3} * 0,02525)} * \left[\ln\left(\frac{0,02525}{1,5 * 10^{-3}}\right) - 1 \right]$$

$$= 17,05 \text{ mm}$$

Výpočet efektivní hodnoty permitivity substrátu

$$e_{ef} = \frac{e_r + 1}{2} + \frac{e_r - 1}{2} * \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \left(\frac{h}{A}\right)}} = \frac{4,5 + 1}{2} + \frac{4,5 - 1}{2} * \frac{1}{\sqrt{1 + 12 \left(\frac{1,5 * 10^{-3}}{0,01738}\right)}} = 3,96$$

Následně vypočítáme délku flíčku L_{patch} .

$$L_{patch} = \frac{c}{2f_r * \sqrt{e_{ef}}} = \frac{3 * 10^8}{2 * 5,6 * 10^9 * \sqrt{3,96}} = 13,45 \text{ mm}$$

Kontrola podmínky

$$\frac{W_{patch}}{h} \geq 1$$

$$\frac{W_{patch}}{h} \geq 1 \Rightarrow \frac{17,05 * 10^{-3}}{1,5 * 10^{-3}} = 11,072 > 1$$

Podmínka platnosti je splněna a vypočtené hodnoty můžeme použít.

$$a = \frac{Z_0}{60} * \sqrt{\frac{e_r+1}{2} + \frac{e_r-1}{e_r+1} * \left(0,23 + \frac{0,11}{e_r}\right)} = \frac{100}{60} * \sqrt{\frac{4,5+1}{2} + \frac{4,5-1}{4,5+1} * \left(0,23 + \frac{0,11}{4,5}\right)} = 1,491$$

$a < 1.52$ pro vypočtené $a = 1,491$ je podmínka splněna.

$$b = \frac{60 * \pi^2}{Z_0 * \sqrt{e_r}} = \frac{60 * 3.1415^2}{100 * \sqrt{4,5}} = 5,583$$

Výpočet šířky napájecího vedení

$$\frac{w}{h} = \frac{2}{\pi} * \left\{ b - 1 - \ln(2 * b - 1) + \frac{e_r - 1}{2 * e_r} * \left[\ln(b - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{e_r} \right] \right\} =$$

$$\frac{2}{3.14159} * \left\{ 6,51926 - 1 - \ln(2 * 6,51926 - 1) + \frac{4,5-1}{2*4,5} * \left[\ln(6,51926 - 1) + 0,39 - \frac{0,61}{4,5} \right] \right\} = 0,34 \text{ mm}$$

$$\frac{w}{h} = 0,34 \Rightarrow w = 0,53 \text{ mm}$$

Napájecí vedení má malou šířku, ale výrobně technologicky zvládnutelnou.

Vodivost antény.

$$G = \frac{W_{patch}}{120 \cdot \frac{c}{f_r}} * \left[1 - \frac{(k \cdot h)^2}{24} \right] = \quad (4.9)$$

kde vlnová konstanta

$$k = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_r}{c} \quad (4.10)$$

Výpočet vodivosti

$$k = \frac{2 \cdot \pi \cdot 5,6 \cdot 10^9}{3 \cdot 10^8} = 117,28$$
$$G = \frac{W_{patch}}{120 \cdot \frac{c}{f_r}} * \left[1 - \frac{(k \cdot h)^2}{24} \right] = \frac{12,77 \cdot 10^{-3}}{120 \cdot \frac{3 \cdot 10^8}{5,6 \cdot 10^9}} * \left[1 - \frac{(117,28 \cdot 1,54 \cdot 10^{-3})^2}{24} \right]$$

$$0,0026488 ==> 2,65 \text{ mS}$$

Reálnou složku impedance antény lze dle [21] určit pomocí vodivosti dle vztahu

$$Z = \frac{1}{2 \cdot G \cdot 10^{-3}} \quad (4.11)$$

$$Z = \frac{1}{2 \cdot 2,65 \cdot 10^{-3}} ==> 188 \Omega$$

Výpočet vložení – vnoření napájecího vedení do flíčku antény.

Přizpůsobení antény a napájecího vedení využívá faktu, že impedance antény je nejmenší ve středu antény a k okrajům se zvyšuje. Pomocí hloubky vnoření napájecího vedení do flíčku antény a jeho optimalizací vůči délce flíčku přizpůsobíme anténu. Impedanci na okrajích flíčku jsme získali předchozím výpočtem a dle níže uvedených vzorců zjistíme délku vloženého vedení tak, abychom dosáhli impedance $Z_0=100\Omega$.

Hloubku vnoření stanovíme dle vzorce z [22]

$$\frac{Z_{in}}{Z} = \sin^4 \left(\frac{\pi \cdot x_s}{L_{patch}} \right) \quad (4.12)$$

Úpravou vzorce dostaneme vztah pro x_s , kde x_s nám udává vzdálenost vnořeného mikropásku od středu flíčku.

$$x_s = \frac{L_{patch}}{\pi} * \sin^{-1} \sqrt[4]{\frac{Z_{in}}{Z}} = \quad (4.13)$$

$$\frac{0,0135}{\pi} * \sin^{-1} \sqrt[4]{\frac{100}{188}} = 0,54 \text{ mm}$$

Hloubka vložení pásku do flíčku

$$L_{stub} = \frac{L_{patch}}{2} - x_s = \frac{13,45}{2} - 0,54 = 6,181 \text{ mm}$$

Tím bychom měli vypočtený základní tvar antény, v následující části budeme provádět simulaci na matematickém modelu.

4.3. Návrh tvaru v programu COMSOL MULTIPHYSICS

Po získání přibližných rozměrů flíčku můžeme provést simulaci programu Comsol. Výpočty provádíme vzhledem k potřebě velkého množství výpočetního výkonu nejprve pro frekvenci 5,6GHz a po získání přibližných správných výsledků provedeme přepočtení v celém rozsahu frekvencí a následně provedeme případné korelace. Hodnotu 5,6GHz jsme stanovili na základě zkušeností s návrhem antén, kde tento kmitočet je o 50MHz výše, nežli je střední hodnota požadovaného kmitočtového rozsahu.

Výběr základního nastavení

Nastavíme základní parametry pro design flíčku a výpočetní prostředí. V záložce **File** a následně **New** vybereme tlačítko **Model wizzard** a následně **3D** pro simulaci ve 3D. Na stránce **Select physics** a v Radio frequency vybereme volbu Electromagnetics waves, Frequency domain (emw). Nastavení parametrů v nově otevřeném modelu zvolíme tlačítko Parameters, které nám přidá do Global definition seznam definovatelných parametrů, zde definujeme veškeré parametry, které budeme dále používat jako proměnné. Nastavení nám umožní v nastavení geometrie používat matematické operace pro definici rozměrů (sčítání, násobení, odčítání) a následně umožňuje optimalizaci.

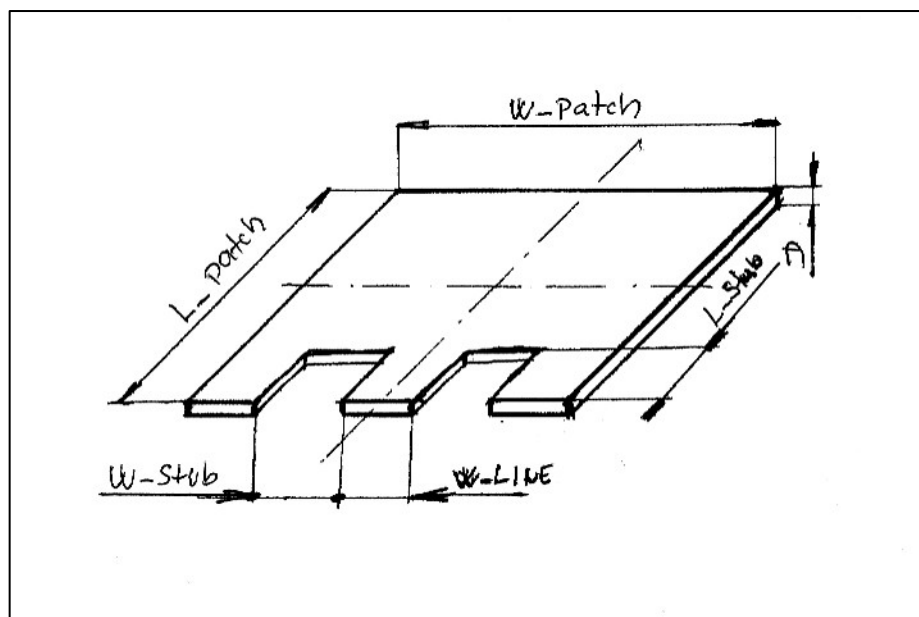
Proměnná	Hodnota	Hodnota SI [m]	Popis
D	1,54 [mm]	0,0015	Tloušťka substrátu
W_patch	17,051 [mm]	0,0200	Šířka flíčku
L_patch	13,45 [mm]	0,0200	Délka flíčku
W_stub	0,53[mm]	0,0020	Šířka napájecího vedení
L_stub	6,18 [mm]	0,00618	Délka vnoření napájecího vedení
W_sub	80 [mm]	0,0800	Šířka substrátu
L_sub	80 [mm]	0,0800	Délka substrátu
L	25 [mm]	0,0400	Vzdálenost mezi flíčky
f_min	5,3 [GHz]	5,3x10E9	Dolní mez frekvence
f_max	5,7 [GHz]	5,7x10E9	Horní mez frekvence

f _x	5,6 [GHz]	5,6x10E9	Frekvence pro úvodní výpočet
lda0	28,63[mm]	0,02863	Vlnová délka $\lambda/2$
h _{max}	0.2*lda0	0,00576	Min. mesh pro vzduch
w _{spoj}	1,374[mm]	0,001374	Tloušťka spojovacího pásku
w _t	2,56[mm]	0,00256	Šířka transformačního členu
L _t	4,21[mm]	0,00421	Délka transformačního členu
L _{st}	3,94[mm]	0,00394	Délka tr. členu v napájení
distanc	50[mm]	0,050	Rozteč mezi flíčky
W _{feed}	2,88[mm]	0,00288	Šířka napájecího vedení
L _{feed}	7,64[mm]	0,00764	Délka napájecího vedení
alfa	45[°]	0,7854rad	Natočení celků

Tabulka 2 Globální parametry pro geometrii modelu a simulace.

Geometrie modelu

V této sekci modelujeme z definovaných rozměrů substrát, flíček a ostatní fyzikální parametry a rozměry. Konceptně je konstrukce napájecího vedení řešena vyjmutím dvou bloků tvořících W_{stub} a L_{stub}. Celkový přístup ke geometrii modelu je v programu Comsol následující. Definuje se rozměr substrátu, jeho šířku, hloubku a tloušťku. Do něj se vloží jednotlivé bloky, ze kterých je tvořen flíček antény a případné propojovací prvky. V dalším nastavení se určuje, které části modelu jsou tvořeny z jakých materiálů. Následně se celý model uzavře do sféry, která nám simuluje blízké i vzdálené okolí. Volbou průměru sféry a zejména tloušťky stěny jsme schopni definovat útlum v prostředí přesně podle našich požadavků.



Obrázek 6 Základní tvar - proměnné

Středy těchto pomocných bloků musíme posunout a proto do Position doplníme vzdálenosti $x = W_stub/2 + W_line/2$ a $y = L_stub/2 - L_patch/2$. Anténu můžeme postupně transformovat i do flíčku čtvercového nebo obdélníkového tvaru s napáječem [16].

Vytvoření okolních a okrajových podmínek pro simulaci antény.

V menu Geometry zvolíme Sphere, vznikne nám koule o definovaném poloměru *sph1* a na jejích hranicích můžeme definovat okrajové podmínky. Dále se budeme zabývat stanovením rozměrů sféry a určením podmínek blízkého a vzdáleného pole. Matematicky je řešení popsáno v [22] a [23] a pro 3D platí:

$$\mathbf{E}_p = \frac{jk}{4\pi} \mathbf{r}_0 \times \int [\mathbf{n} \times \mathbf{E} - \eta \mathbf{r}_0 \times (\mathbf{n} \times \mathbf{H})] \exp(jk\mathbf{r} \cdot \mathbf{r}_0) dS \quad (4.14)$$

Pro náš výpočet vycházíme z níže uvedeného zjednodušení, kde *r* je vnitřní poloměr sféry a *L* je maximální rozměr kteréhokoliv z prvků.

$$\frac{r}{L} > \frac{L}{\lambda} \gg r > \frac{L^2}{\lambda} \quad (4.15)$$

Volíme vnitřní průměr sféry 120mm, což nám výše uvedenou podmínku splňuje a tloušťku stěny 20mm, kde tloušťka stěny nám představuje homogenní prostředí odpovídající rozměrem 100m vzduchu.

Definice zobrazení

Zde nastavujeme pohled na model, pro lepší přehlednost nastavíme pohled 1 pro celkový přehled a pohled 2 pro detail.

Definice elektromagnetické vlny a frekvenční domény

Nastavení perfektně vodivých ploch. V modelu potřebujeme označit plochy, které budeme považovat za perfektně vodivé a které jsou reálně tvořeny mědí.

4.4. Elektromagnetická vlna, Frekvenční doména, nastavení

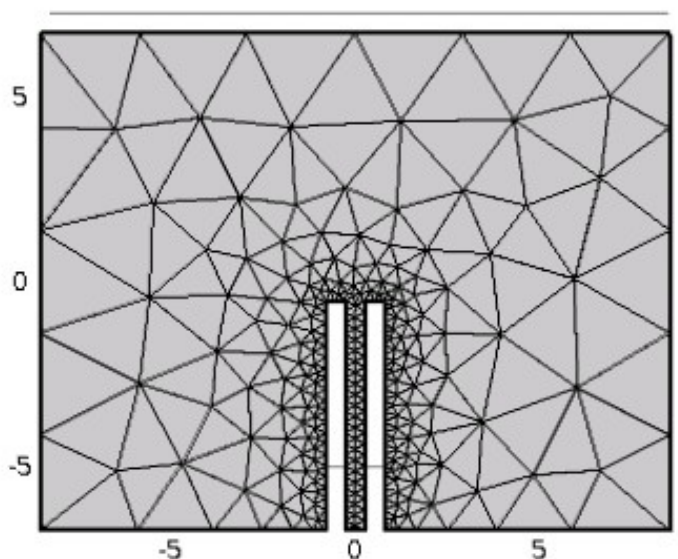
Nastavujeme parametry materiálů substrátu, vzduchu, definujeme, které plochy tvoří vzdálené pole a které patří do pole blízkého. Doplníme tabulku definice vlastností substrátu o níže uvedené parametry, které jsme získali z katalogového listu [20].

Název	Jednotka	Hodnota	Měrná jednotka	Skupina
Relativní permitivita	ϵ_r	4,5	I	Basic
Relativní permeabilita	mur	1	I	Basic
Elektrická vodivost	sigma	0	S/m	Basic

Tabulka 3 Vlastnosti substrátu FR4

Mesh – návrh pokrytí modelu sítí pro výpočet.

Pro korektní výpočet stanovíme jako výchozí hodnotu velikost ok sítě 0,2x vlnová délka pro materiál vzduch a hodnotu převrácené hodnoty z odmocniny relativní dielektrické konstanty pro substrát. Pokud bychom zvolili nevhodně hustotu a strukturu sítě, výpočet by trval neúměrně dlouho a případně by vedl k chybným řešením. Nejjemnější MESH volíme v oblasti napájení, to znamená na hranách, které nám zobrazují napájecí port, napájecí vedení a hrany bezprostředně přilehlé.



Obrázek 7 Detailní pohled na navržený MESH

Definujeme zvláště velikost sítě pro substrát, flíček, vzduch, okrajové podmínky a povrch koule. Pro hrany, které mají významný vliv na přizpůsobení – hrany napájecího vedení, zanoření do flíčku a přizpůsobovacího vedení je nutno volit MESH velice pečlivě. Na obrázku je názorně vidět zjemnění ok výpočtové sítě v zájmových oblastech kolem napájení flíčku.

Špatně navržená síť může vést k nekonečnému počtu iterací a tím zmařit výpočet. Více se problémům s chybami v návrhu věnuji v [40].

Obrázek 7 zobrazuje pohled na změnu hustoty MESH v zájmových oblastech

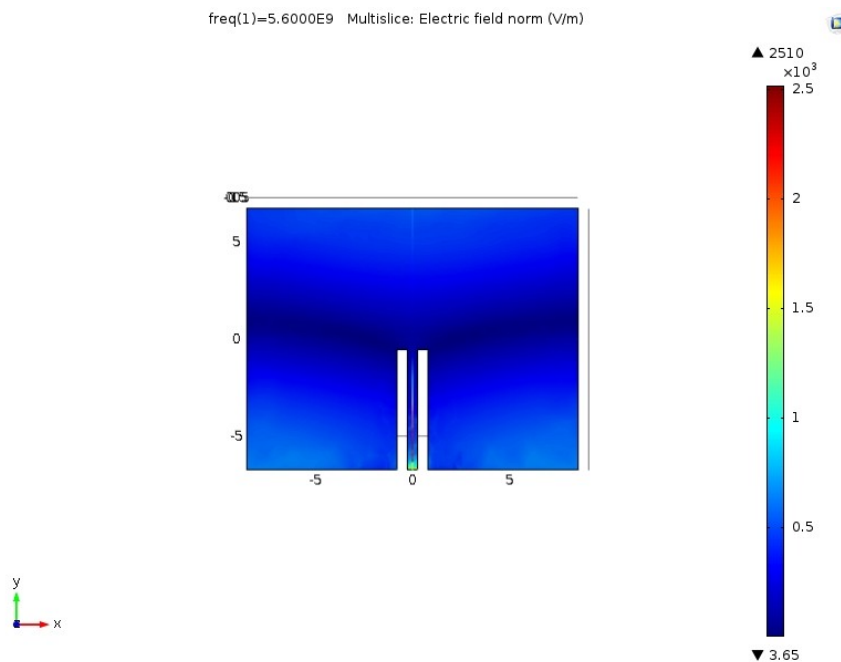
Výpočet jednoho prvku

Vzhledem k výpočetní náročnosti celého modelu a k tomu, abychom měli i parciální výsledky, na kterých můžeme podrobně popsat postup optimalizace, volíme postupný výpočet. Proto nejprve počítáme pouze jeden prvek a na základě zjištěných hodnot budeme provádět postupnou optimalizaci.

4.5. Výsledky – komentář ke stavu simulace versus ruční výpočet rozměrů.

Nastavení zobrazení rozložení elektrického pole

V podsekcí x-planes a y-planes do pole Planes vyplníme 0 a v poli Electric Field (emw) klikneme na Plot. Tím dojde ke správnému vykreslení intenzity pole na substrátu vzhledem k uspořádání osových souřadnic.



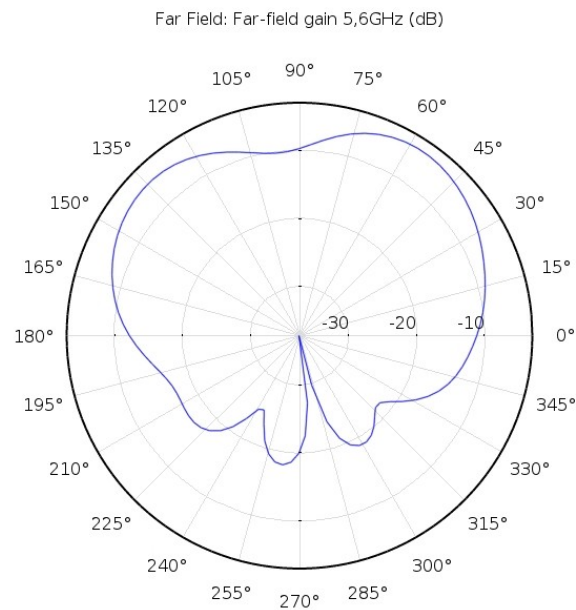
Obrázek 8 Neoptimalizovaná anténa

Na obrázku Obrázek 8 vidíme rozložení elektrického pole na desce substrátu před optimalizací. Anténa je téměř nepřizpůsobená a v podstatě nevyzařuje. K rozdílu mezi simulací a ručním výpočtem došlo z několika příčin. U ručního výpočtu je uvedeno, že vztahy jsou pouze přibližné a samotný výpočet trpí chybou zaokrouhlení. Přesné a kompletní vztahy výpočtu jsou popsány ve zdrojích, na které se odkazují výše. Další odchylky mezi simulovaným a reálným stavem očekávám vlivem odrazů a nepřizpůsobení na přechodu konektor – anténa. Toto se však projeví až při finálním měření. Pro naši potřebu je zjednodušený výpočet naprosto postačující. V simulaci je jako napájecí konektor použita optimalizovaná ploška.

Vzhledem k tomu, že předmětem této práce je následná optimalizace rozměrů, výsledky ručního výpočtu pro nás jsou velmi orientační. Pokud bychom měli už nyní anténu vypočtenou správně, neměli bychom dále co optimalizovat

Polární souřadnice

Pro zobrazení směrové charakteristiky antény nám Comsol umožňuje přímo využít funkci pro vykreslení. V nastavení roviny x zadáme 1, v nastavení roviny z zadáme 0 a můžeme si charakteristiku přímo prohlédnout.

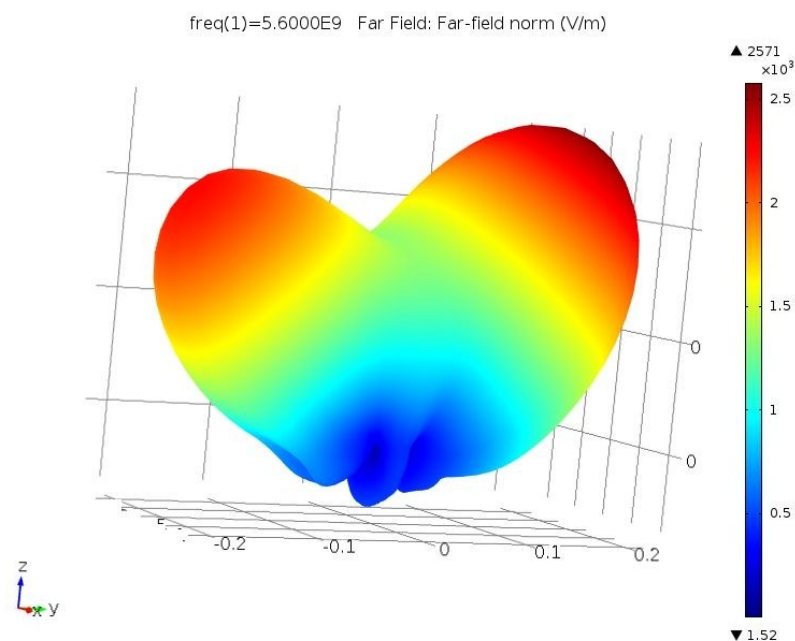


Obrázek 9 Vyzářovací diagram v rovině E

Na obrázku 9 vidíme neoptimalizovanou charakteristiku. Anténa má výrazné boční laloky a žádný zisk.

Vykreslení ve 3D

Směrová charakteristika ve 3D nám dává lepší přehled o vyzářovacím charakteru antény. Klikneme na 3D Plot Group 3.



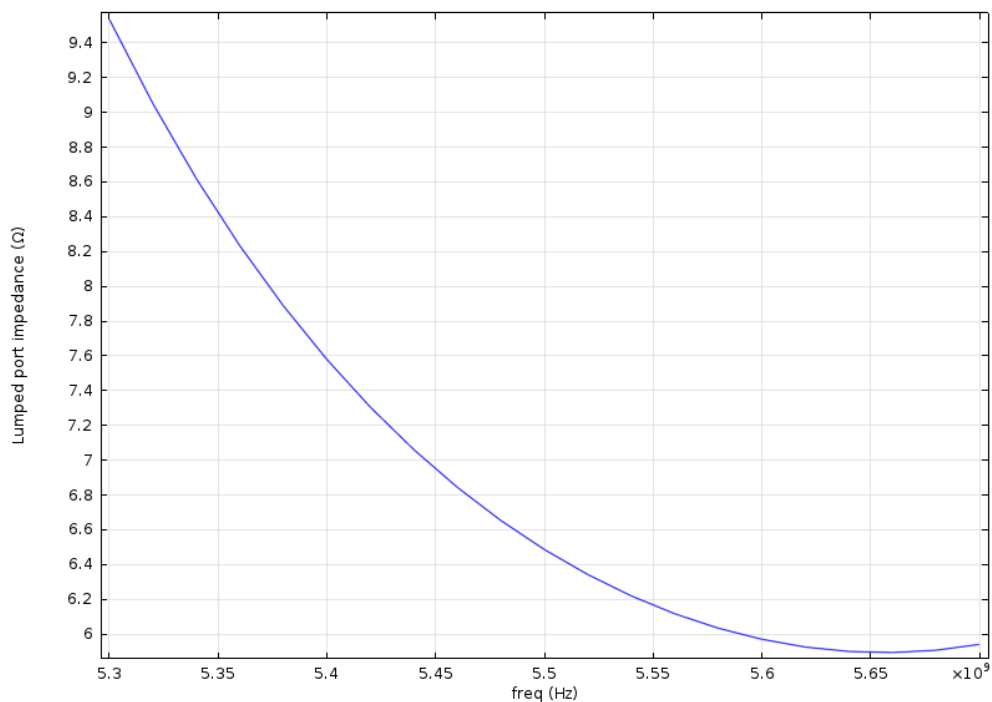
Obrázek 10 Neoptimalizovaný návrh ve 3D

Klikneme na Zoom Extents v grafickém navigačním okně pro přiblížení zobrazení.

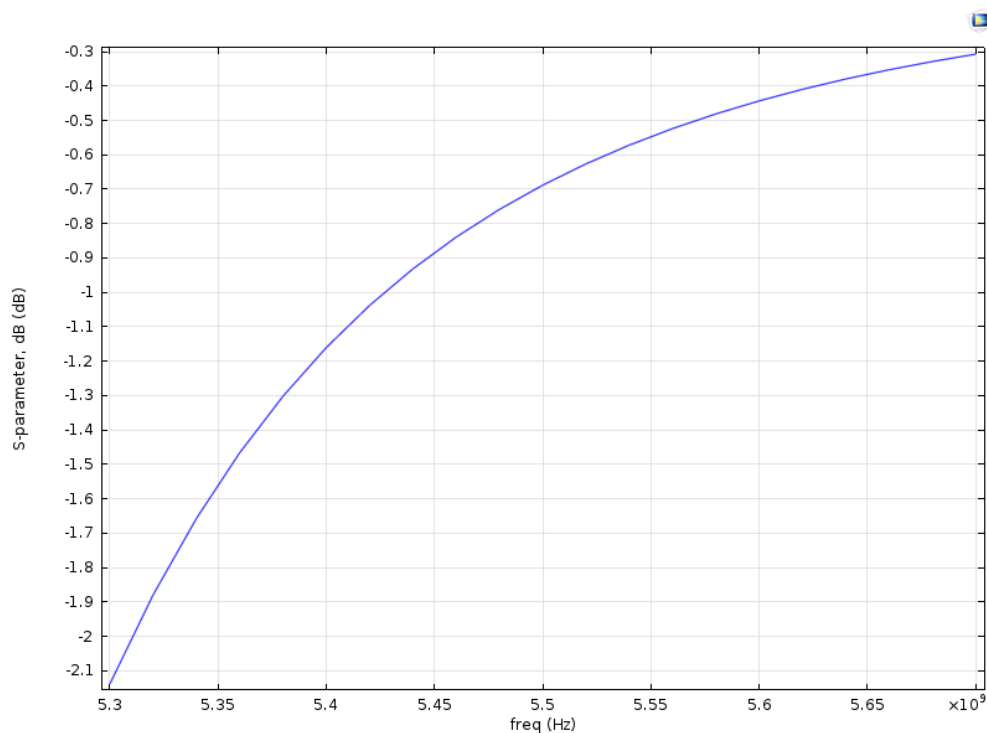
Vypočtené hodnoty – parametr S_{11} a Z_0

Ve sledovaném rozsahu frekvencí lze přímo zobrazit hodnoty činitele odrazu a impedance napájecího portu.

Na Obrázek 11 a Obrázek 12 vidíme závislost impedance a hodnot přizpůsobení v závislosti na frekvenci v předpokládaném pracovním rozsahu. Je patrné, že flíček není přizpůsobený a je potřeba jej dále optimalizovat.



Obrázek 11 Závislost impedance napájecího portu na frekvenci reálná složka



Obrázek 12 Závislost S_{11} na frekvenci u nepřizpůsobené antény

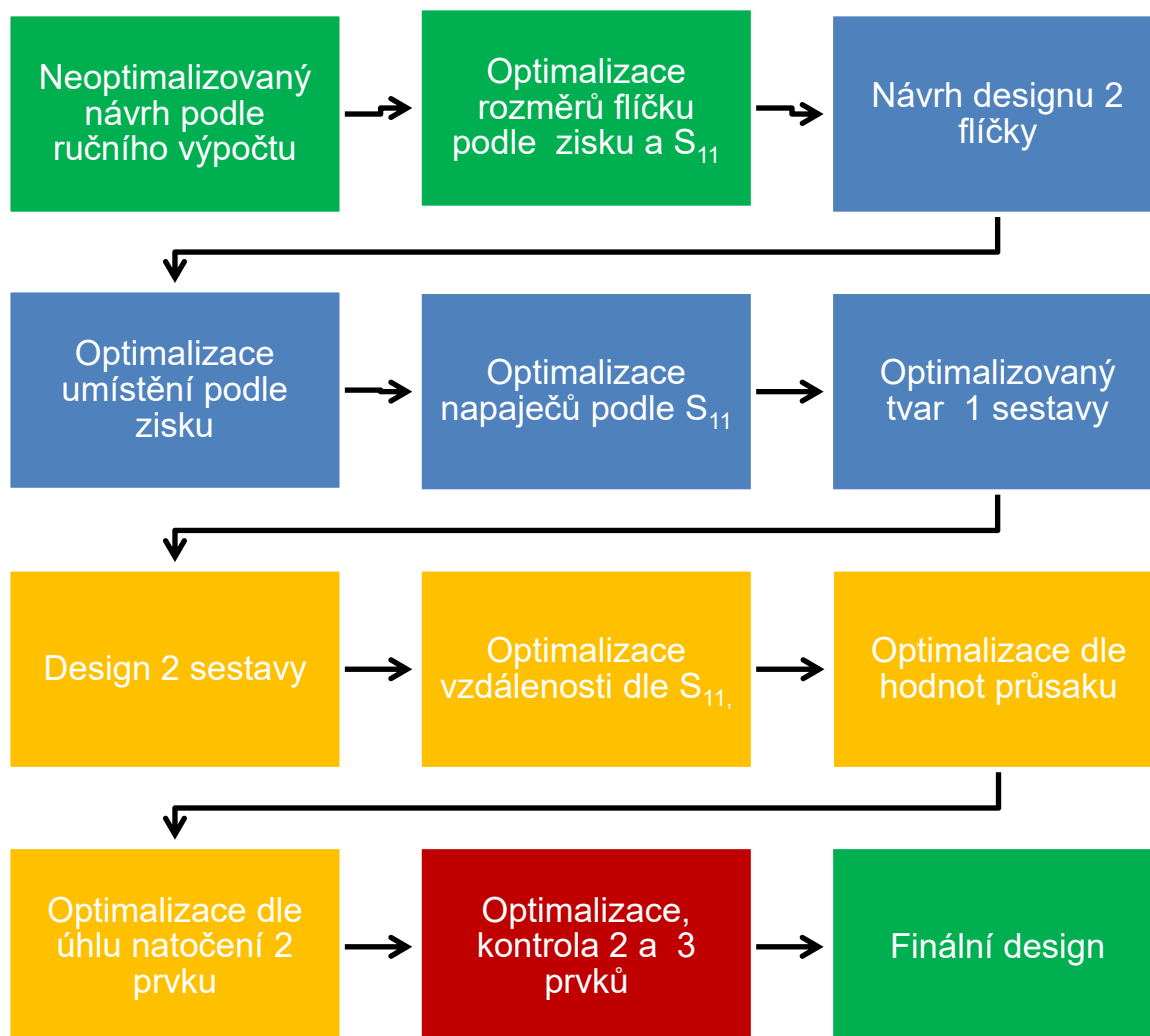
Tabulky vypočtených hodnot - nastavení

Tabulky nám umožní přehledně rozdělit výsledky a následně s nimi pracovat. Jako výchozí nastavení u výpočtů je vždy volena tabulka NEW. My si nastavíme zvláště tabulky pro hodnoty impedance, S_{11} , hodnoty pole jednotlivých sond a podobně.

Tímto máme hotovy veškeré základní předpoklady pro započetí optimalizace a splnění bod 1 zadání práce.

5. OPTIMALIZACE

5.1. Schéma postupu optimalizace



Obrázek 13 Schéma optimalizačního procesu

Použití programu Comsol by mohlo svádět k jednoduchému pohledu na obtížnost této disertační práce. Právě Comsol ale umožňuje plně využívat a nastavit různé optimalizační možnosti a jejich plné využití předpokládá zvládnutí širokých teoretických základů podstaty činnosti těchto metod, zvládnutí volby parametrů a omezení parametrů. Metody vyžadují přesné zadání limitů meshování a iteračních pochodů, jak je patrné z obrázku Obrázek 14. Právě toto tvoří podle mého názoru disertabilní základ mé práce. Číselné značení portů, oblastí, hran a bodů je zřejmé z modelů v příloze na CD. Problematice optimalizace jednoho flíčku se věnuji také v [41].

Před vlastní optimalizací máme k dispozici rozměry získané analytickým výpočtem. Protože analytický výpočet zahrnuje značná zjednodušení a zaokrouhlovací rozdíly, předpokládáme po optimalizaci změnu rozměrů flíčku i napáječe. Nejprve provádíme optimalizaci vlastního jednoho flíčku tak, abychom dosáhli co nejlepšího zisku. Poté

optimalizujeme napájecí vedení k dosažení požadované impedance flíčku s předpokladem použití samostatného flíčku. Následuje přepočítání pro předpokládané uspořádání do funkčního celku k dosažení očekávaného zisku. Následně je zapotřebí celý funkční blok optimalizovat podle zisku a přizpůsobení k dosažení co nejlepších parametrů. Dále se věnujeme vlastní optimalizaci dvou funkčních bloků dle hodnot získaných na sondách a to hledáním jak optimální vzdálenosti, tak úhlu natočení. Sondy byly umístěny vždy na napájecím portu daného flíčku. Nezajímá nás absolutní hodnota minima, ale cílem je najít optimální vzdálenost a úhel, při kterém dochází k největšímu poklesu průsaku. Závěrem je toto simulováno i pro konfiguraci 3x3 a následně změřeno v laboratoři.

Vzhledem k náročnosti na výpočetní výkon budeme vlastní optimalizaci nejprve provádět pro jednu frekvenci 5,6 GHz – označenou jako f_x a po získání základního přehledu budeme v optimalizačním modulu provádět výpočet pro daný rozsah frekvencí f_{\min} až f_{\max} . Základní rozptyl rozměrů pro optimalizaci vychází z [24]. V zářiči o délce L ve směru jeho podélné osy v rozmezí $0,7$ až $1,0 \lambda$ a šířce W ve směru kolmém na podélnou osu v rozmezí $0,5$ až $0,8 \lambda$, jsou vytvořeny souměrně vzhledem ke středu zářiče.

5.2. Stanovení omezujících podmínek optimalizace.

Při vlastní optimalizaci můžeme nastavit podmínky – meze, ve kterých předpokládáme výskyt hledaného minima nebo maxima.

Constraints handling method – podle zvolené optimalizace zadáváme vhodnou hodnotu buď předpokládaného zisku antény nebo předpokládanou hledanou hodnotu přizpůsobení.

U zisku antény lze vycházet z obecně známých teorií [19], [25], které nám dávají předpoklad zisku jednoho flíčku, a každé zdvojnásobení počtu flíčků přidává maximálně 3 dB. U přizpůsobení můžeme vycházet z minimálního požadavku -10 dB, avšak pro početní úlohu optimalizace použijeme hodnoty v rozsahu -15 dB až -23 dB.

5.2.1. Penalty

Volba penalty je jeden ze způsobů statického ukončení výpočtu, který nám však nedává příliš mnoho možností k nastavení a případné optimalizaci vlastního procesu.

5.2.2. Lagrangeova metoda, rozšířený Lagrangin.

Základním principem Lagrangeovy metody je použití rozšířeného Lagranginu. V první iteraci jsou hodnoty Lagrangeových multiplikátorů nastaveny na nulu.

Původní minimalizační úloha vypadá následovně:

$$\min_{\substack{x \in \Omega \\ 1 \leq x \leq u}} f(x), \quad \Omega = \{x \in R^n : h(x) = 0\}, \quad h : R^n \rightarrow R^m, \quad m < n, \quad (5.1)$$

kde předpokládáme, že f je dvakrát spojitě diferencovatelná funkce a h je spojitě diferencovatelná funkce, Ω je přípustná množina.

Úloha konvexního kvadratického programování s omezením ve tvaru rovnosti má tento tvar:

$$\min_{\substack{x \in \Omega \\ l \leq x \leq u}} f(x), \quad f(x) = \frac{1}{2} x^T A x - b^T x \quad \Omega = \{x \in R^n : Bx = c\}. \quad (5.2)$$

Protože známe omezení intervalu hodnot, můžeme výpočet převést na metodu řešení úlohy s rovností vynucenou použitím vnější penalty. Pro výpočet řešení pomocí metody vnější penalty předpokládáme, že funkce je konvexní a má jedno řešení. Metoda spočívá v zahrnutí rovnostních vazeb do cenové funkce přičtením vhodného členu, který penalizuje porušení rovnostní vazby.

Definujme Lagrangian:

$$L_0 : R^{n+m} \rightarrow R$$

$$L_0(x, \lambda) = f(x) + \lambda^T (Bx - c) = \frac{1}{2} x^T A x - b^T x + (Bx - c)^T \lambda \quad (5.3)$$

a rozšířený Lagrangian

$$L_A(x, \lambda, \rho) = \frac{1}{2} x^T (A + \rho B^T B) x - b^T x + (Bx - c)^T \lambda. \quad (5.4)$$

Tímto způsobem se získají data, která svými hodnotami obvykle přesahují zadané meze. V každé další iteraci jsou Lagrangeovy multiplikátory aktualizovány na základě vypočtených hodnot a vyhodnocení odchylky od stanovených mezí.

Uvažujce původní minimalizační úlohu dostáváme:

$$\min_{x \in R^n} f_\rho(x), \quad f_\rho(x) = f(x) + \frac{1}{2} \rho \|h(x)\|^2, \quad (5.5)$$

kde $\rho > 0$ je penalizační parametr a $\|h(x)\|^2$ je penalizační funkce.

Použitím vhodného algoritmu (např. SMALSE, BICGstab) se dobereme k hodnotám, které odpovídají hodnotám požadovaným. Jakmile je dosaženo stanovených hodnot, v našem případě hodnot minima S_{11} nebo hodnot maxima intenzity elektrické pole, výpočet se ukončí. Metoda Lagrangeových multiplikátorů je velmi robustní, ale vyžaduje správné nastavení proměnných pro iterační proces, zejména nastavení hodnoty penalty. Vyšší hodnota penalty vede k vynucení splnění rovnostního omezení přesně, ale úloha bude hůře podmíněna a bude pomalu konvergovat, kdežto v případě nízké hodnoty penalty hrozí nebezpečí špatné stabilizace podúlohy řešiče. Můžeme nastavit použití automatického nebo ručního nastavení počátečních podmínek penalty. Automatické nastavení je výchozí a počítá počáteční hodnoty penalty ze zadaných dat a omezujících podmínek a hodnot ve výchozím bodě. Můžeme nastavit omezení pro maximální počet iterací výběrem strategie pro aktualizaci parametru δ – tolerance pro vnitřní řešič. Strategie máme k dispozici celkově tři, dvě jsou dynamické, kde automaticky proběhne změna tolerance řešiče podle výsledků iterace, nebo ruční, kde nastavíme hodnoty maximální možné odchylky řešiče ve finálním výsledku.

Parametry výpočtu a jejich popis:

ρ – penalta

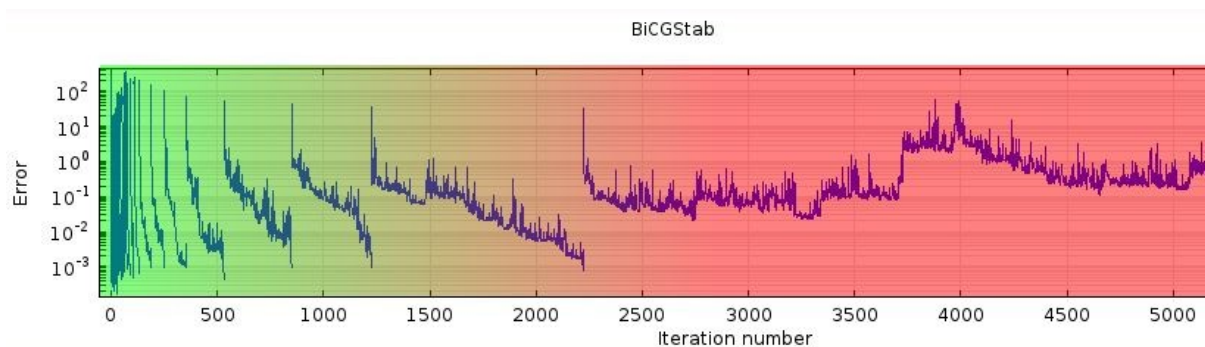
τ – faktor tolerance pro ρ

γ – multiplikační faktor pro ρ

μ – horní mez

Maximální počet rozšířených iterací

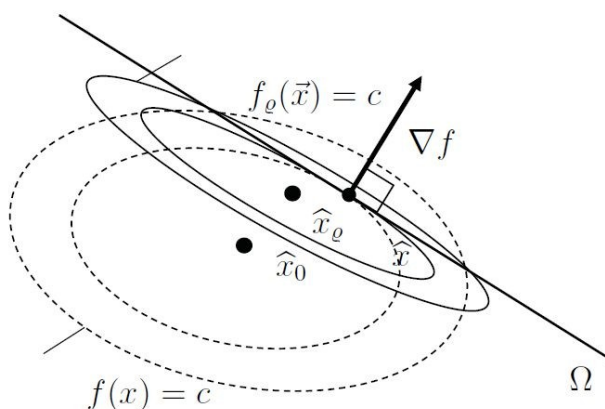
δ – tolerance pro vnitřní řešič, může být dynamická nebo staticky nastavená



Obrázek 14 Průběh konvergence výpočtu optimalizace v rozsahu frekvencí

Konvergenční metoda je frekvenčně závislá, výše uvedený obrázek 14 je z výpočtu fličky v širším rozsahu frekvencí. V levé části, na frekvencích přibližně 4-6GHz proběhlo odhadem 30 až 40 výpočetních cyklů s počtem iterací 8-50 – zeleně zvýrazněná část. V posledních cyklech je patrný nárůst počtu iterací začínajících od hodnoty 1200 iterací po 2200, kde jeden cyklus již trvá odhadem 1000 cyklů a od iterace 2500 dále je vidět nedokončený výpočet, kde v průběhu cyklu dochází i k nárůstu chybovosti nad původní meze. Tento jeden výpočetní cyklus probíhal přibližně 14 hodin.

Vzhledem k tomu, že Lagrangeova metoda vypočte Lagrangeovy multiplikátory pro každé omezení zvláště, jsou potom tyto výsledky k dispozici i v postprocessingu pro další zpracování. Jejich hodnoty představují citlivost cílové funkce na vázané omezení.



Obrázek 15 Znárodnění kvadratické penalty [26]

Z výše uvedeného je patrné, že hodnoty penalty i omezení při vlastním výpočtu musíme nastavit pečlivě, protože nevhodné nastavení výrazně prodlužuje výpočetní čas nebo může celý výpočet zhatit. Vhodné hodnoty pro penaltu jsou 10^{-3} , multiplikační faktor γ je optimální kolem hodnoty 10. Tolerance pro vnitřní řešič δ je nastavena na 10^{-6} , avšak v případě výskytu prvků antény s rozměry pod 0,2mm při frekvenci kolem 5GHz je vhodné nastavit toleranci vnitřního řešiče na 10^{-7} .

5.2.3. Fyzická omezení daná výrobními možnostmi

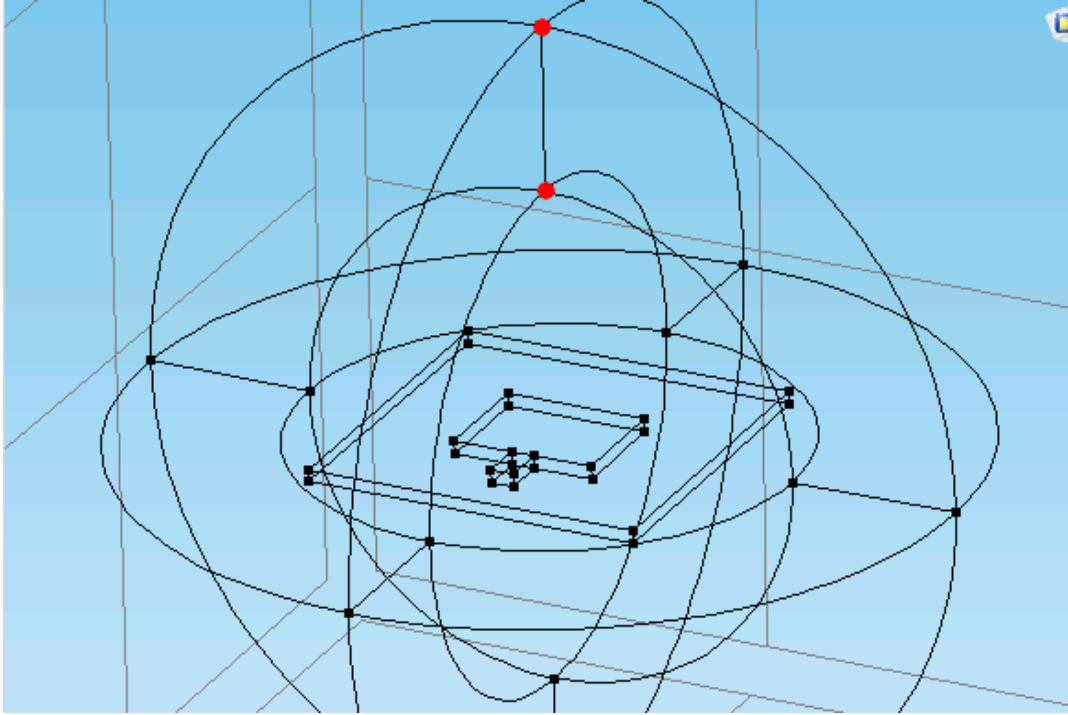
Anténu budu vyrábět na substrátu nejběžnější průmyslovou metodou - fotocestou. Proto mi také vstupují do návrhu antény mezi omezující podmínky i technologická omezení výroby. Přesnost výroby obrazců fotocestou je přibližně 6 až 18 mils [27] podle třídy přesnosti výrobce, což odpovídá přibližně minimálnímu rozměru 0,15mm až 0,3mm. Lze tedy říci, že pokud nebudeme požadovat speciální a drahou výrobu, můžeme jako minimální šíři cesty na substrátu považovat hodnotu okolo 0,15mm. V případě dodržení výrobní tolerance 2 mil je odchylka 0,05mm což při tloušťce cesty 0,15mm dělá chybu 33,8%. Tato chyba může celý návrh znehodnotit.

5.3. Optimalizace jednoho flíčku

Stanovím základní rozptyl rozměrů pro optimalizaci v zářiči o délce L_{patch} v rozmezí 0,7 až $1,3 \lambda/4$ a šířce W_{patch} , které jsou vytvořeny souměrně vzhledem ke středu zářiče. Dále potřebujeme stanovit vztažný bod pro výpočet optimalizace.

Far Field – nastavení vztažných bodů pro výpočet ve vzdáleném poli

Pro výpočet Far-Field je nejprve nutno zadat podmínky v sekci Definition. Vložil jsem bod B do místa sféry s označením 24 – umístěný v ose y přímo nad středem substrátu. Vůči tomuto vztažnému bodu provádím výpočty. Pro kontrolu vložím i vztažný bod C, který je umístěný na vnější straně sféry. Slouží pouze pro informativní kontrolu při výpočtech, proto jej dále nebudu komentovat. Hodnoty intenzity pole v bodě C musí být vždy menší nežli v bodě B o útlum vloženého prostředí – sféry. Bod C je umístěn také kolmo nad středem substrátu.



Obrázek 16 Definice bodů pro výpočet vzdáleného pole

Tímto mám hotovy základní předpoklady pro zahájení optimalizace flíčku a další práce. Nejprve jsem prováděl optimalizaci rozměrů flíčku W_patch a L_patch v závislosti na dosažení maxima zisku ve vzdáleném poli v bodě B. Pro hledání maxima zisku v bodě B použijeme předpoklad z teoretického základu metody, kde hledáme:

$$\max f(x) \quad (5.6)$$

Po doplnění o konkrétní optimalizační hodnoty dostávám vztah pro řešič

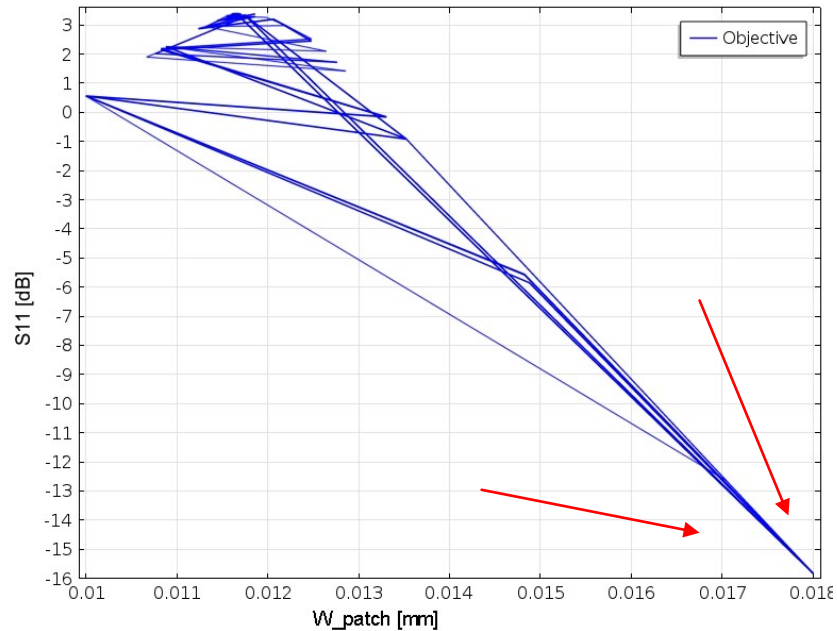
$$f(x) = compl.intopl(compl.emw.gaindBefar)$$

Dále jsem nastavil podmínky pro ukončení výpočtu a chování v případě shodnosti výpočtu, jak je popsáno dále – použil jsem metodu rozšířeného Lagranganu a stanovil jsem meze. Vývojový diagram výpočtu s využitím obecného Lagrangiánu je popsán [28].

$$\left\{ \begin{array}{l} \min Q(u(\xi), (\xi)) \\ \xi \in \mathcal{C} \\ L(u(\xi), (\xi)) = 0 \\ lb_P \leq P(u(\xi), (\xi)) \leq ub_P \\ lb_\psi \leq \psi(\xi) \leq ub_\psi \\ lb_b \leq \xi \leq ub_b \end{array} \right. \quad (5.7)$$

Stanovil jsem tyto optimalizační parametry
 $\xi = (W_patch, L_patch),$

$$\begin{aligned}\psi(\xi) &= eFar, \\ 0,7*\lambda/4 &< W_{patch} < 1,3*\lambda/4, \\ 0,7*\lambda/4 &< L_{patch} < 1,3*\lambda/4,\end{aligned}$$



Obrázek 17 Průběh iterací optimalizačního procesu

Na obrázku Obrázek 17 vidíme postupný průběh iterací optimalizačního procesu, tak jak jsou popsány v kapitole 2 u metody Nelder-Mead. Zrcadlení, kontrakce, stažení, tak jak postupně optimalizační proces probíhá do dosažení stanoveného cíle.

Dále budeme optimalizovat napájení prvku tak, abychom se z důvodu dalšího řazení prvků co nejvíce přiblížili hodnotě 100Ω . Vycházím z (5.6) a následných úpravách

$$f(x) = comp1.emw.S11dB \quad (5.8)$$

Drobnou změnou tvaru jsem dosáhl symetrického rozložení pole na flíčku. Původně nedocházelo k téměř žádnému vyzařování plochou antény a naopak se velmi negativně na vyzařovací charakteristice podepisovalo nežádoucí vyzařování z napáječe.

5.3.1. Optimalizace vstupního napájecího portu

Po výpočtu maximálního zisku je vhodné upravit rozměry napájecího vedení změnou délky a šířky napájecího pásku. Optimalizaci provádíme opět metodou Nelder-Mead za dodržení výše uvedených předpokladů.

$$f(x) = abs(comp1.emw.S11dB) \quad (5.9)$$

Protože nám nastavení v programu umožňuje hledat maxima nebo minima, využijeme skutečnosti, že pro nás nejlepší výsledek optimalizace poskytuje absolutní hodnota S_{11} pro jednu frekvenci f_x .

Metoda použitá pro optimalizaci – Nelder-Mead

Tolerance optimalizace – 0,01.

Sestavíme výpočetní podmínku Expression funkce, protože potřebujeme optimalizovat na absolutní hodnotu S_{11} v dB.

Podmínky optimalizace je nutno nastavit tak, aby patch byl technologicky výrobitelný, proto necháme výpočet s omezením proběhnout tak, abychom měli tloušťku napájecího vedení alespoň 0,2mm.

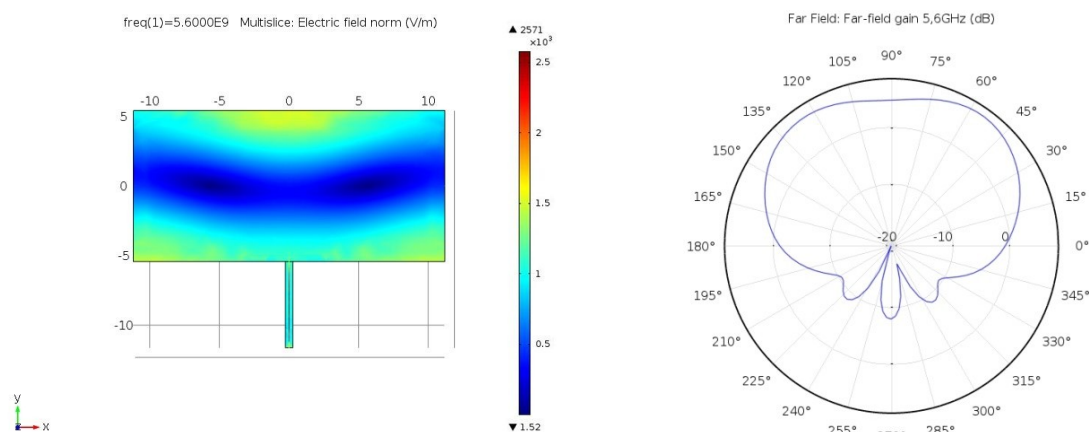
Na obrázku 18 je patrné vylepšení rozložení intenzity pole, kdy nejprve dojde k symetričtějšímu rozložení v rozích, později i na protilehlé straně vůči napájecí.

V menu Control Variables and Parametres zvolíme parametr, který chceme optimalizovat, což je v tomto případě W_{line} a zadáme výpočetní hodnoty pro vlastní optimalizace.

Výchozí hodnotu Initial Value ponecháme na spočítané hodnotě 3,53mm.

Lower bound – dolní mez zadáme na 0,1mm. Upper bound – horní mez zadáme na 6mm.

Další úpravy vedou k ještě vyšší intenzitě pole v ploše, následnými úpravami se však snažíme dosáhnout co nejrovnoměrnějšího rozložení a to tak, aby intenzita byla co nejvyšší na napájecí a protilehlé hraně a co nejmenší uprostřed. Důležitá změna ve tvaru flíčku pro kterou jsem se rozhodl, vede k umístění napájecího vedení nikoliv zadáním vzdálenosti od středu flíčku a tím provedení napájení jako zapuštěné vedení, ale postupnou optimalizací ke čtvercovému tvaru s napájecím vedením umístěným uprostřed hrany. Je to dáno zejména tím, že anténa se ve výsledném použití polarizuje buď vertikálně, nebo horizontálně a toho se dosahuje dvěma napájecí zaústěnými do středů prvků kolmo na sebe. Proto je vhodné flíček řešit jako čtvercový. Dále se tedy budeme zabývat řešením tohoto tvaru.



Obrázek 18 Rozložení pole a zobrazení zisku antény po první optimalizaci

Z obrázku 18 vidíme oproti neoptimalizovanému tvaru změnu poměru délky k šířce flíčku. Zisk antény nám stoupl na 4,8 dB, co se týká směrovosti a vyzařovacího diagramu antény došlo k narovnání středového propadu v hlavním laloku a k podstatnému omezení zadních laloků.

	Před optimalizací	Po optimalizaci
Zisk [dB]	-9,77	4,82
S_{11} [dB]	-2,24	-24,08
Z_0 [Ω]	100,25+713,45i	100,01-12,601i

Tabulka 4 Hodnoty před a po optimalizaci

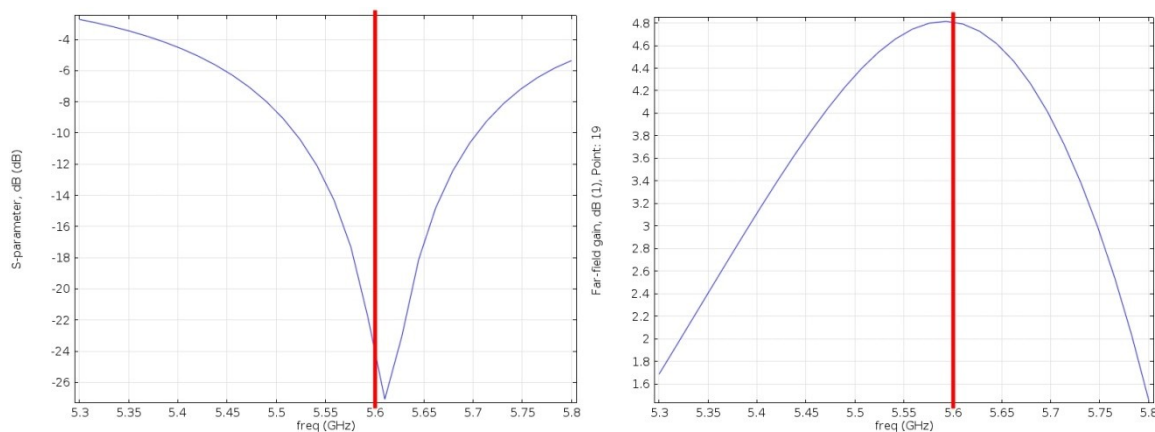
Vidíme, že optimalizační algoritmus změnil zisk na hodnotu, kterou lze akceptovat a zároveň vylepšil přizpůsobení. Na obrázku 18 také vidíme základní rozložení intenzity pole po optimalizaci na zisk. V danou chvíli se nám již do vyzařování zapojují rovnoměrně protilehlý střed antény a rohy na straně napáječe.

5.3.2. Výpočet pro rozsah frekvencí

Nyní potřebujeme zkontrolovat průběh přizpůsobení, zisk a impedanci v rozsahu frekvencí dle zadání. V Study 1, Step1, Frequency domain v části Study settings a podčásti Frequencies klikneme za zadání rozsahu frekvencí. Zadáme počáteční frekvenci f_{\min} . a počet kroků pro výpočet. Počet kroků by měl být minimálně stejný jako je rastr frekvencí používaný pro pásmo 5GHz, tj. 5MHz. Zadáme koncovou frekvenci f_{\max} . Stiskneme tlačítko Replace, čímž se přepíšu hodnoty pro výpočet.

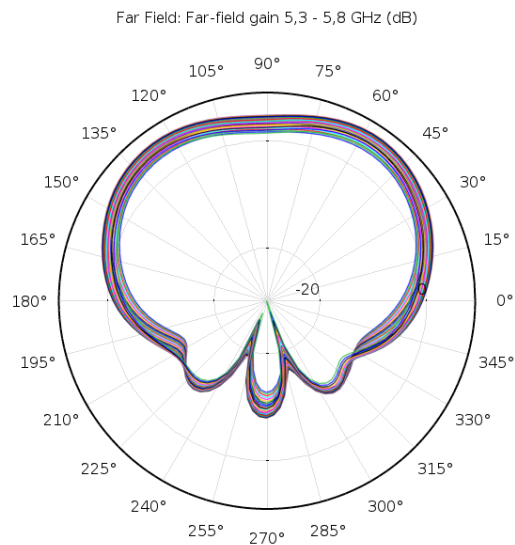
Po stisku tlačítka Compute se spustí vlastní výpočet. Výsledné hodnoty nalezneme v tabulce New.

Vidíme, že již máme optimalizováno přizpůsobení v požadované frekvenci 5,6GHz. Další optimalizace před produkčním nasazením do výroby by směřovaly k dosažení co nejlepšího přizpůsobení v celém pracovním rozsahu.



Obrázek 19 Průběh zisku a S_{11} v závislosti na frekvenci po optimalizaci napájecího vedení

Z obrázku 19 je patrné, že anténa je přizpůsobena v rozsahu frekvencí 5,525GHz až 5,7GHz. Zisk vykazuje v celém rozsahu, ale antény tohoto typu obvykle dosahují zisku od 4 dB do 8 dB, proto jako použitelný rozsah můžeme v tuto chvíli uvažovat frekvenci 5,47GHz až 5,7 GHz.

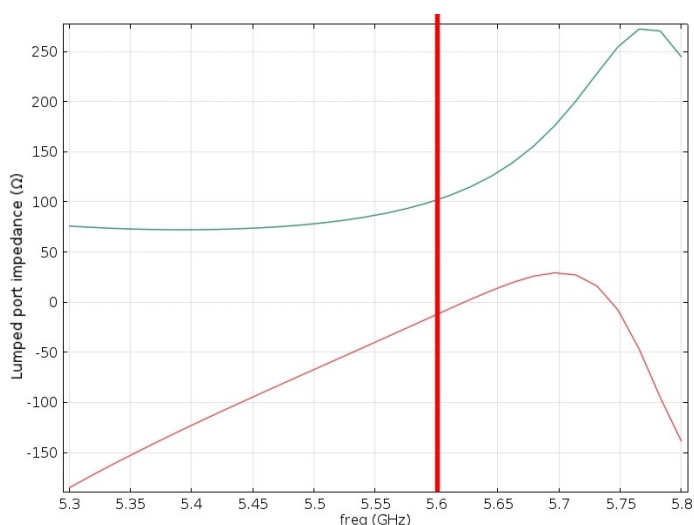


Obrázek 20 Vyzářovací diagram po optimalizaci napájecího vedení

Největšího zisku anténa dosahuje na frekvenci 5,6GHz, pak zisk postupně s vyšší frekvencí klesá strměji. Tohoto faktu využíváme při volbě středové frekvence pro výpočet, kde jako výpočtovou frekvenci nevolíme přesně aritmetický střed, ale hodnotu přibližně o 10% vyšší. Vidíme jeden výrazný hlavní lalok, který je symetricky rozložen vůči ose, avšak bez výrazného středu.

Z výše uvedených výsledků a celkového chování optimalizace je patrné, že musíme do optimalizační metody zahrnout i vliv změny šířky napájecího vedení W_{line} . Oproti neoptimalizované anténě vidíme vylepšení směrové charakteristiky, spočívající ve zlepšení zisku v ose hlavního laloku a výraznému omezení bočních laloků. Stále provádíme optimalizaci ze stejným nastavením řešiče, pouze měníme podle potřeb proměnné.

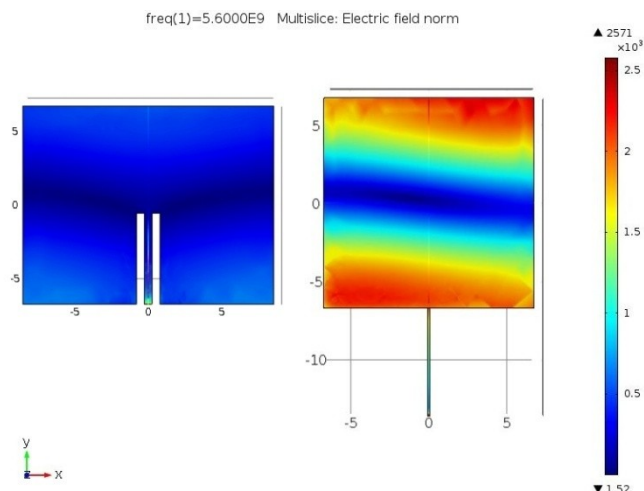
Po této optimalizaci vidíme již velice vyrovnané rozložení intenzity pole na substrátu. Vzhledem k vypočítaným hodnotám by již bylo možno tuto simulaci považovat za finální. Jak však vidíme na spodním obrázku, ještě lze dále pracovat se směrovou charakteristikou a ziskem v ose hlavního laloku směrem k dosažení většího zisku v ose [29].



Obrázek 21 Vypočítané hodnoty S_{11} a impedance Z_1 napájecího portu v závislosti na frekvenci

Tabulka naměřených hodnot a celý model je v příloze na CD.

V obrázku 21 jsou vyneseny hodnoty impedance a to jak reálné, tak imaginární části. Anténa je naladěna na námi požadovanou hodnotu 5,6 GHz.



Obrázek 22 Jeden patch před a po optimalizaci

Při vlastní optimalizaci nám vyplynulo, že flíček nelze řešit tak, že řešíme nezávislé parametry a hodnoty – přizpůsobení vstupu a intenzitu pole, ale že tyto hodnoty spolu výrazně souvisejí. Proto se v řešení zabýváme komplexní optimalizací rozměrů L_{patch} , W_{patch} , W_{stub} , W_{line} , L_{stub} . Několik postupných kroků optimalizace jednoho flíčku popisují v [39].

Z výše uvedených výpočtů jsme získali optimalizovaný tvar flíčku pro daný rozsah frekvencí, který použijeme k další optimalizaci. Z obrázku přizpůsobení nám vyplývá, že anténa je optimálně naladěna na požadovanou frekvenci 5,6GHz. Zároveň jsme zatím nesplnili zadání v oblasti přizpůsobení v celém pracovním rozsahu. Toho dosáhneme optimalizací vzájemných poloh dvou a více flíčků tak, aby přizpůsobení bylo alespoň -10 dB v celém pracovním rozsahu. Důležitá poznámka. Od samého počátku práce předpokládám další řazení flíčků do soustavy, proto je pro mne výhodnější vést optimalizaci tvaru tak, abych opustil původní verzi se zapuštěným napájecím vedením a změnil tvar na čtvercový. Tímto máme splněn bod 2 zadání práce.

5.4. Vytvoření druhého flíčku

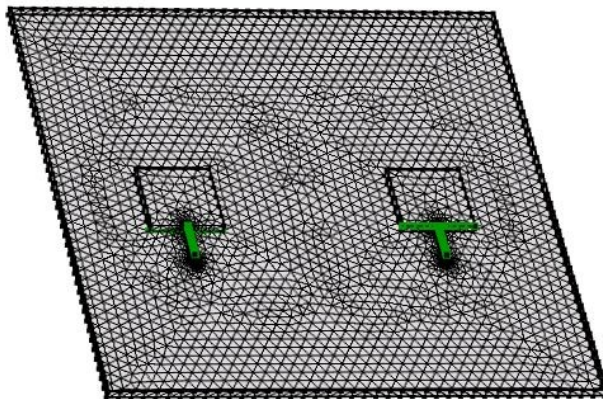
Úprava rozměrů substrátu

V Global definition, Parameters – v tabulce parametrů nejprve změníme šířku substrátu na 120mm a nastavíme velikost sféry na 210mm.

Posuv prvního flíčku. Pro symetrické rozložení potřebujeme dosáhnout posuv flíčku symetricky vůči ose x o délku $L/2$ vlevo. V Geometry – patch najdeme sekci position a posuneme flíček v x-ovém směru o $-L/2$, to znamená že patch se nám přemístí o polovinu vzdálenosti L směrem vlevo. Klikneme na build selected pro překreslení. V Geometry – stub najdeme sekci position a v ose x doplníme posunutí jako v předchozím bodě. Nový parametr posunutí bude tento : $-L/2 + W_{\text{stub}}/2 + W_{\text{line}}/2$ a klikneme na build all objects pro překreslení. Vykreslím další patch jako kopii původního flíčku. V menu Geometry klikneme na Transforms a zvolíme Copy a vybereme do sekce Input objects dif1. Najdeme

Displacement, v nastavení osy x umístíme prvek do vzdálenosti L a klikneme na Build All pro vykreslení.

Na obrázku Obrázek 23 je základní struktura pro rozložení prvků v konfiguraci 2x2. Nejprve umístíme prvky co nejblíže k sobě. Je možné i vzájemné překrytí prvků použitím vícevrstvé desky, ale to nám silně zvyšuje náročnost a cenu výroby, proto zůstaneme u uspořádání na dvouvrstvé desce.



Obrázek 23 Uspořádání prvků a MESH pro výpočet uspořádání 2x2 po optimalizaci

Poté vykreslíme rozložení sítě pro výpočet a zkontrolujeme, zda máme v nastavení MESH zdůrazněny hrany jemnější strukturou v okolí napájecího vedení. Zjemnění výpočetní sítě v okolí napájecího vedení nám umožní zpřesnit výpočet S_{11} parametru

Nastavení sondy

Nastavení sondy – cílem tohoto výpočtu je zjistit, jaké množství energie je vyzářeno nenapájeným flíčkem a poté provést optimalizaci vzájemné vzdálenosti flíčků od sebe.

Nejprve jsem počítal potřebné veličiny na napájecím portu flíčku 2, na který pro daný výpočet umístíme sondu.

V Definition vybereme Probes a zvolíme Global Variable Probe.

V sekci Expression v pravém horním rohu vybereme Model – Components – Electromagnetic Waves, Frequency Domain – Energy and Power – $emw.intWe$ – Total electric energy a potvrdíme. V tabulce Table and plot units vybereme jednotku μeV . Jako základní jednotka se nám nabízí Joule, ale vzhledem k předpokládané velikosti zjištěné hodnoty by číslo bylo velice malé, proto volíme elektronvolt. Jednotku elektronvolt můžeme použít na základě [30].

Kontrola před výpočtem

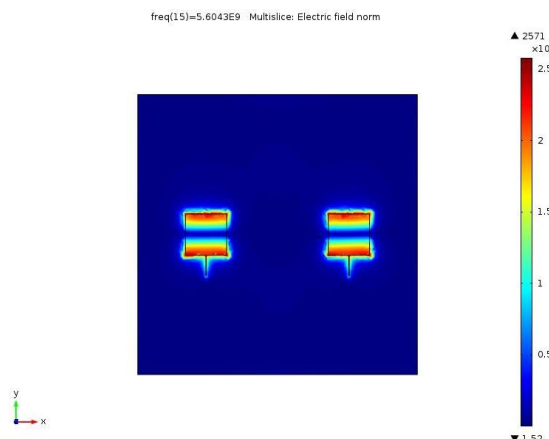
V electromagnetic Waves najdeme Perfect electric conductor 2 a zkontrolujeme, zda máme vybrány všechny měděné plochy včetně nově přidaných. V Lumped Port 1 v sekci Selection ponecháme pouze port 26 jako napájecí. Port 56 pro tuto simulaci vymažeme – nejde o napájený port. Vlastní výpočet provedeme pro daný rozsah frekvencí nastavením v Study, Step 1: Frequency Domain.

Optimalizace vzdálenosti druhého flíčku – vzájemné polohy. Cílem tohoto výpočtu je zjistit jak se vzájemná poloha flíčků ovlivňuje. K tomu můžeme dojít dvěma cestami – optimalizovat podle S_{11} parametrů napájecích portů nebo podle hodnoty získané pomocí sondy umístěné na flíčku 2, případně podle celkového množství vyzářené energie.

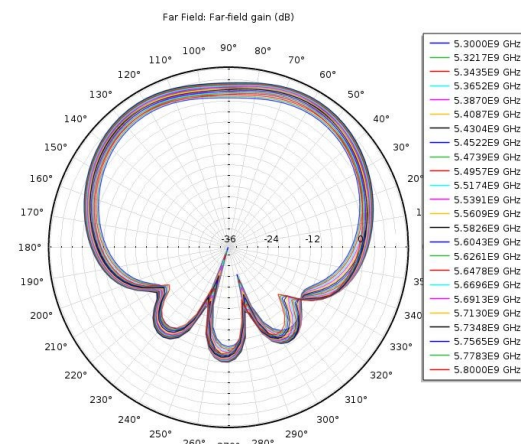
Nejprve jsem řešil, jak se vzájemná poloha ovlivňuje. Použil jsem stejnou optimalizační funkci

$$f = \text{abs}(\text{comp1.emw.S11dB}) \quad (5.10)$$

Výsledky dat jsou v tabulce přílohy číslo 5. Optimalizace parametru L byla prováděna metodou Nelder-Mead s omezením na 500 výpočtů a pro vzdálenost $L=25\text{mm}$ až 60mm .



Obrázek 24 Zobrazení rozložení pole



Obrázek 25 Směrová charakteristika 2x2

Na obrázku 24 je znázorněno rozložení pole na dvou flíčcích, při napájení levém a zároveň je zobrazena směrová charakteristika antény, ze které je patrné ovlivnění vyzářovacího diagramu nenapájeným flíčkem. Proti předchozí vyzářovací charakteristice došlo k přírůstku zisku v pravé části laloku o 0,5 dB a tím i k mírnému posunu čela antény. Stále však nelze mluvit o optimálním tvaru..

V tabulce 5 jsou uvedeny hodnoty po optimalizaci vzájemné polohy flíčků 2x2 se zaměřením na dosažení co nejlepší hodnoty parametru S_{11} .

freq (Hz)	LP impedance (Ω)	S_{11} , dB (dB)
5.6000E9	50.157-0.44870i	-46.472

Tabulka 5 Nejlepší dosažené přizpůsobení druhým flíčkem

Ve výpočtu je jako optimalizační funkce použita absolutní hodnota z parametru S_{11} , proto nejlepší hodnotou je nejvyšší kladná hodnota ve vzdálenosti 0,26mm.

5.5. Optimalizace na nejlepší parametry celkové vyzáření energie.

Pro danou optimalizaci je vhodné zkoumat množství celkové vyzáření energie anténním subsystémem a vztáhnout k vzájemné vzdálenosti flíčků.

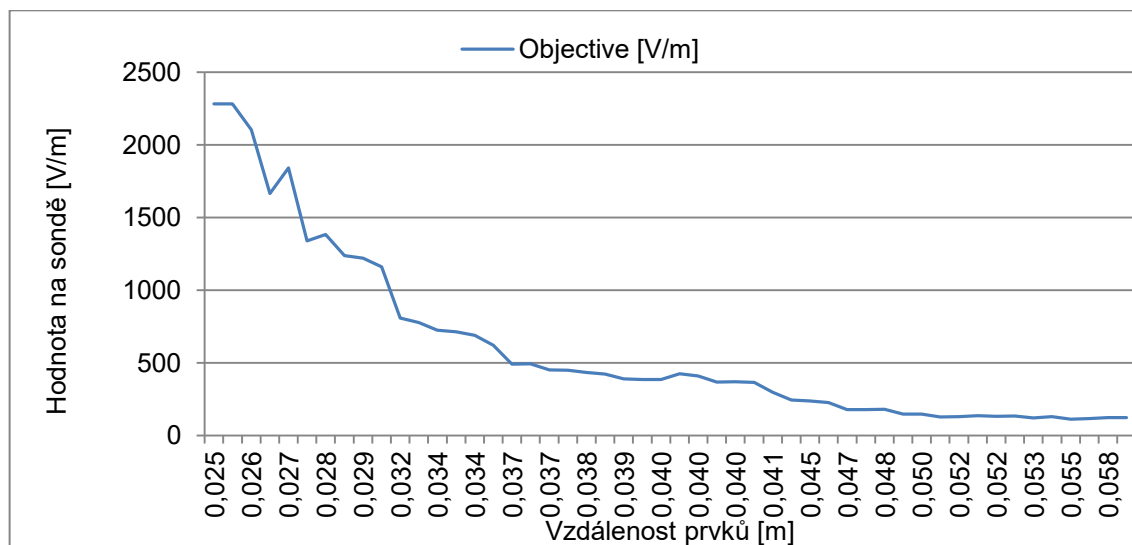
Zvolil jsem řešení k výpočtu podle celkového množství - Total electric energy.

V menu Optimization nastavíme proměnné optimalizace dle výše uvedených popisů.

V menu Objective function nastavíme $\text{abs}(\text{comp1.emw.intWe})$ – hledáme maximum absolutní hodnoty. V Control Variables and Parameters vybereme optimalizační hodnotu L1 (L2) a zadáme rozsah pro výpočet v rozmezí 25-60mm.

$$f_{m2} = \text{abs}(\text{comp1.edge1}) \quad (5.11)$$

Použitá optimalizační metoda Monte Carlo s omezením na 50 hodnot. Vypočtené hodnoty jsou uvedeny v příloze č.1, hodnoty jsou znázorněny na obrázku 26.



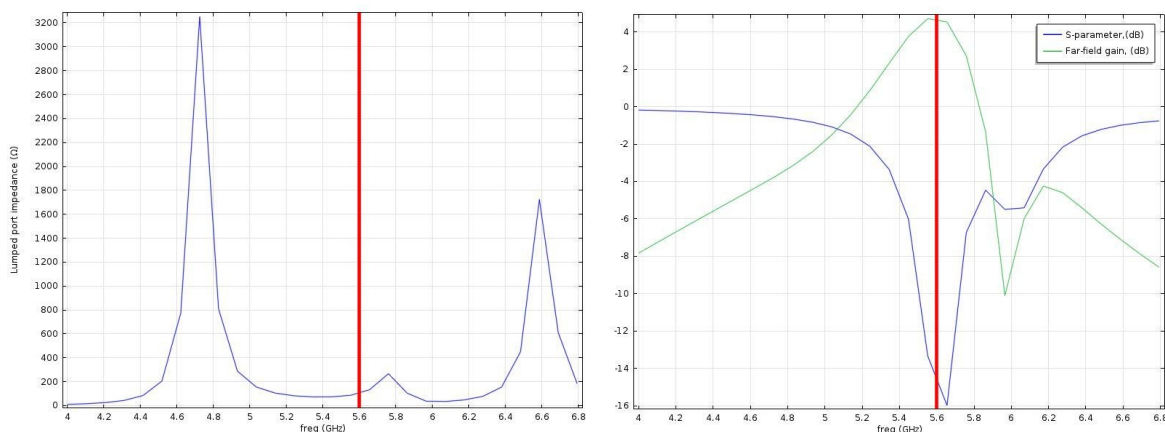
Obrázek 26 Závislost průsaku do druhého flíčku a vzdálenosti prvků

Z obrázku 26 nám vyplývá jako nejvhodnější umístění prvků ve vzdálenosti přibližně 26-27mm, protože zde je pokles nejstrmější. V případě, že nejsme prostorově omezováni, můžeme flíčky umístit dále. V pravé části směrového diagramu na modelu v příloze na CD je patrné ovlivnění vyzařovací charakteristiky vedlejším flíčkem. Popis jednoho kroku optimalizace je uveden také v [38].

Před dalším postupem je velmi vhodné výše uvedenou simulaci provést pro širší okolí pracovní frekvence, abychom byli schopni omezit případné nežádoucí jevy. Proto provedeme výpočet hodnot S_{11} ještě jednou pro rozsah frekvencí 4GHz až 7GHz.

freq (GHz)	S_{11} , dB (dB)	LP impedance (Ω)
5,60	-15,98	100,01-12,601i

Tabulka 6 Lokální minima funkce a hodnoty přizpůsobení.



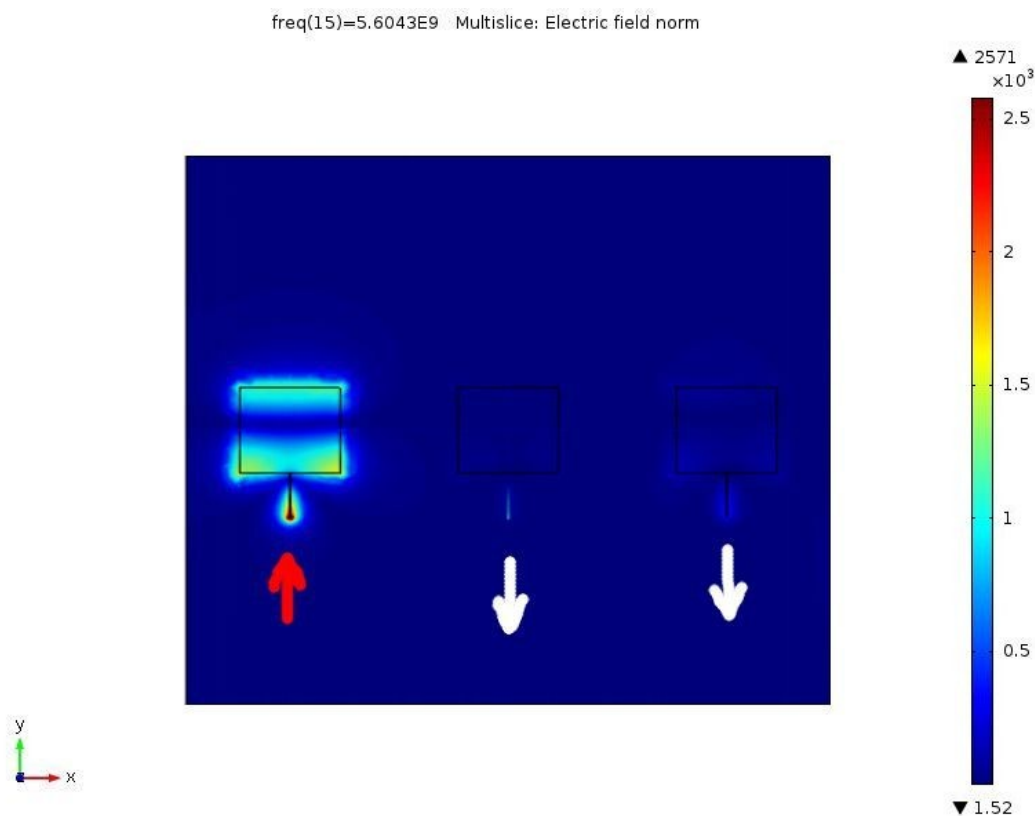
Obrázek 27 Impedance napájecího portu, zisk a S_{11} v širším okolí

Vidíme, že po optimalizaci umístění dvou flíčků došlo k rozšíření přizpůsobené oblasti, použitelná šířka pásma je v tuto chvíli přibližně 100MHz. Impedančně je reálnou složkou anténa přizpůsobena v rozmezí 5,15GHz až 5,65GHz.

5.6. Návrh a rozložení prvků pro uspořádání 3x3.

Předmětem práce je zhodnocení průsaků do sousedních anténních systémů v uspořádání pro přenos 3x3. V této kapitole se budeme věnovat obecnému problému průsaku signálu do sousedních flíčků na jednoduchých modelech pro uspořádání 3x3.

Pro základní uspořádání do konfigurace 3x3 jsem zvolil rozmístění symetricky podle středu s napájením z levé strany anténní soustavy viz. Obrázek 28. Protože se jedná o symetrické uspořádání, je v dané chvíli naprosto irrelevantní, zda je napájení z pravé nebo levé strany. Obrázek 28 zobrazuje schéma napájení a výstupu signálu pro uspořádání 3x3, kde napájený port je vlevo a na porty 2 a 3 jsou umístěny sondy a zároveň rozložení intenzity elektrického pole na všech 3 flíčcích bez optimalizace. Napájený je opět vlevo.



Obrázek 28 Neoptimalizované rozvržení flíčků

Z obrázku je patrné, že dochází k průsaku signálu do dalších flíčků, takže hledání optimální vzdálenosti bude předmětem dalších simulací.

5.7. Optimalizace vzájemné polohy pro uspořádání 3x3

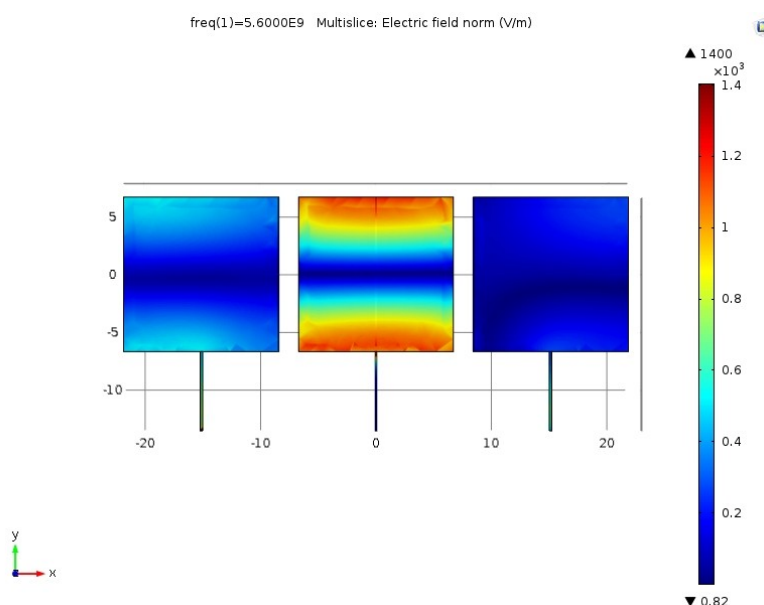
Pro zjišťování hodnot a optimalizaci v uspořádání 3x3 musíme v Component1, Definition přidat další sondu umístěnou na třetí flíček do napájecího vedení. Popis umístění sond do modelu je uveden níže.

Maximalizace

Pro zjištění maxim jsem zvolil optimalizační metodu Nelder Mead a maximální počet výpočtů jsem omezil na 50. Protože se jedná o symetrické uspořádání, opět můžeme použít jako funkci pro výpočet absolutní hodnotu na sondě 1.

$$f_{m3} = \text{abs}(\text{comp1.edge1}) \quad (5.12)$$

Níže jsou zobrazeny hodnoty rozložení pole v substrátu, směrová charakteristika a 3D model.

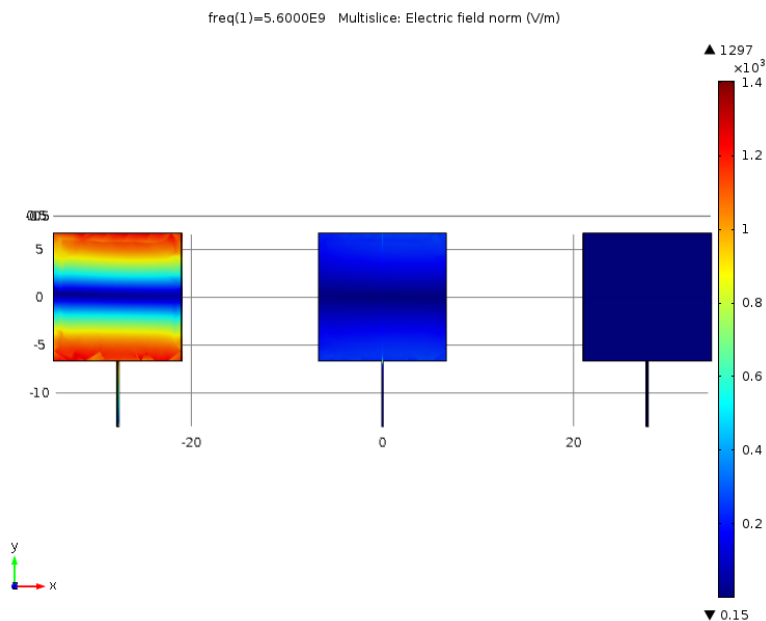


Obrázek 29 Uspořádání 3x3 optimalizovaný pro MAX.

Z obrázku 29 je patrné ovlivnění ostatních flíčků, největšího průsaku dosáhneme při umístění ve vzdálenosti středů 30mm. Data jsou výsledkem použití optimalizační funkce Nelder-Mead s penaltou. Napájený flíček je opravdu úplně vlevo.

Minimalizace průsaku.

Pro optimalizaci vzdálenosti na průsak do sousedního flíčku jsem zvolil metodu Nelder-Mead s maximálním počtem iterací 50 pro vzdálenost L v rozsahu 25-60mm. Hledal jsem minimální hodnoty na sondě edge1 podle níže uvedené funkce.



Obrázek 30 Uspořádání 3x3, optimalizace pro minimalizace hodnot na sondě.

$$f_{min3} = \text{abs}(\text{comp1.edge1}) \quad (5.13)$$

V nastavení výpočtu optimalizační funkce je nutno změnit Type, Multiple objectives a Solution na Minimum of objectives respektive Minimization.

Minimálního průsaku do sousedního flíčku dosáhneme ve vzdálenosti středů 22,5 mm.

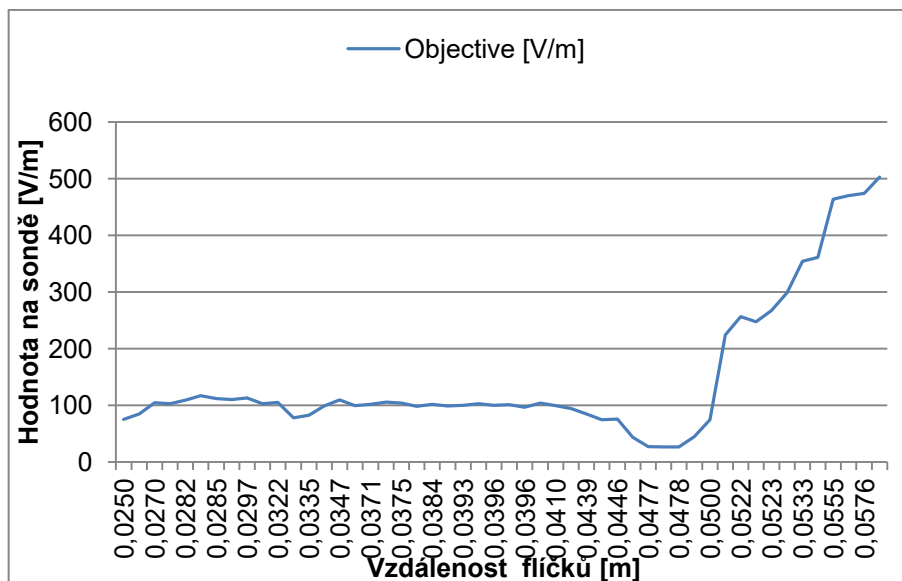
Zjištění průsaku do druhého flíčku.

V Component1, Definition zvolíme pravým tlačítkem myši Probes a zvolíme Edge probe. V sekci Probe type zvolíme Maximalization, v sekci Source selection, Selection zvolíme Manual a vybereme hranu druhého napájecího portu 74. V sekci Expression volíme Model, Component1, Electromagnetic Waves, Electric, Tangential electric field, Electric field norm – emw.normE.

Zjištění průsaku do třetího flíčku.

V Component1, Definition zvolíme pravým tlačítkem myši Probes a zvolíme Edge probe. V sekci Probe type zvolíme Maximalization, v sekci Source selection, Selection zvolíme Manual a vybereme hranu druhého napájecího portu 74. V sekci Expression volíme Model, Component1, Electromagnetic Waves, Electric, Tangential electric field, Electric field norm – emw.normE.

V Component1, Results a Derived Values vybereme pravým tlačítkem myši Point evaluation a v sekci Selection změníme výběr na Manual a dále vybereme hrany pro výpočet - 54.

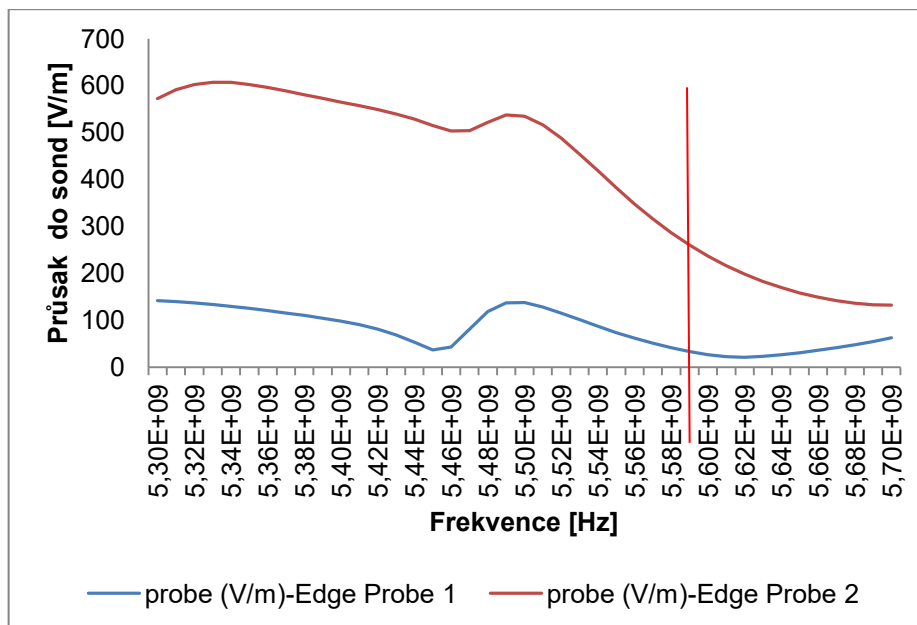


Obrázek 31 Závislost napětí na sondě na vzdálenosti flíčků.

Data pro obrázek 31 jsou výsledkem optimalizační funkce Nelder-Mead s použitím Lagrangeova rozšíření a jsou v příloze č. 2. Je patrné, že minimum průsaku je opět v oblasti rozteče středů kolem 47mm, pak dochází vlivem rezonance opět ke krátkodobému nárůstu.

Zjištění závislosti průsaku na frekvenci.

V této poslední simulaci základního modelu 3x3 zjišťujeme závislost průsaku do vedlejších flíčků v závislosti na frekvenci. Jako základní rozsah frekvencí použijeme 5,3-5,8GHz ze zadání této práce. Pro odečet hodnot použijeme sondy Edge probe1 a Edge probe2. Zjištěná závislost je uvedena na obrázku 32.



Obrázek 32 Závislost průsaku napětí na sondách na frekvenci pro oba flíčky.

Data pro obrázek 32 jsou v příloze č. 3. Vlivem charakteristiky antény lze říci, že velikost průsaku u této antény je frekvenčně závislá. Což si následně potvrzujeme i měřením. Tvrzení

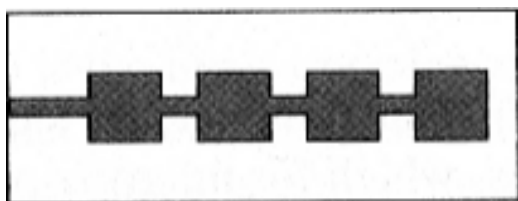
však nelze zevšeobecnit, protože v případě, že budeme mít jinou konstrukci antény, nebo jenom jiný tvar, průsaky mohou vypadat jinak. Velikost průsaku závisí nejenom na vzdálenosti a natočení, ale i na přizpůsobení antény a jejím zisku. Tímto můžeme považovat bod 4 jako splněný, ale budeme se problematikou dále zabývat v části kompletace flíčků do funkčního celku.

5.8. Seskupení flíčků do funkčního celku.

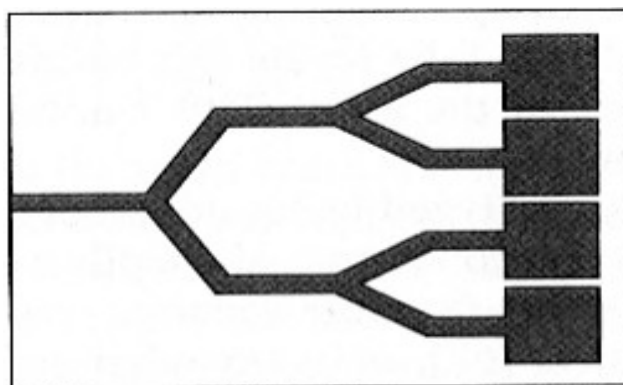
Simulací jednoho flíčku jsme dosáhli zisku přibližně 4 dB. V zadání práce je požadováno dosažení zisku antény alespoň 4 dB. Vyššího zisku jsme schopni dosáhnout pouze řazením flíčků do funkčního celku. Předpokládám, že tohoto výsledku budeme schopni dosáhnout po seřazení 4 flíčků. Uspořádání bude jako na obrázku Obrázek 34 podle [25], obdobně řešeno v [31].

Nejprve budeme simulovat paralelní řazení 2 flíčků a provedeme optimalizaci pro dosažení co největšího zisku antény. Optimalizaci budeme provádět pro vzdálenost mezi flíčky L v rozmezí 25-60mm.

$$f_{2max} = comp1.intop1(comp1.emw.gaindBefar) \quad (5.14)$$

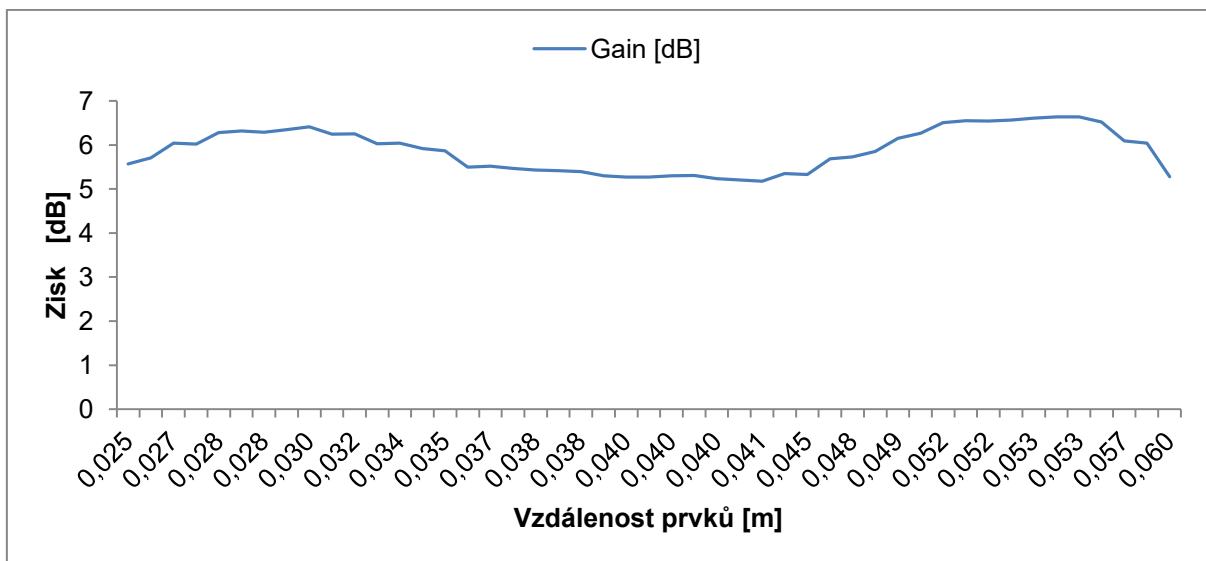


Obrázek 33 Sériové řazení flíčků [19]



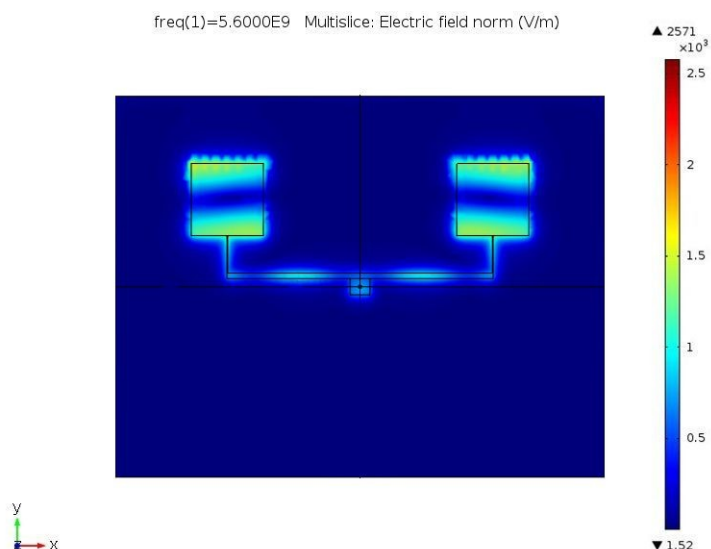
Obrázek 34 Spolupracující řazení flíčků paralelní [19]

Pro hodnotu dosažení maximálního zisku v bodě B – viz popis stanovení vztažných bodů pro výpočet hodnot ve vzdáleném poli. Vypočtené hodnoty jsou v příloze modelu na CD.



Obrázek 35 Závislost vzdálenosti prvků a zisku soustavy flíčků

Ve sledovaném rozmezí frekvencí zisk kolísá v závislosti na vzdálenosti flíčků v rozsahu 5-7 dB, takže je nutno optimalizovat i na vzdálenost mezi prvky. Optimalizaci napájecího vedení se budeme zabývat až v celkovém návrhu antény. Obrázek 36 znázorňuje rozložení intenzity pole ve dvou flíčcích a v napájecím vedení.



Obrázek 36 Paralelní řazení 2 flíčků

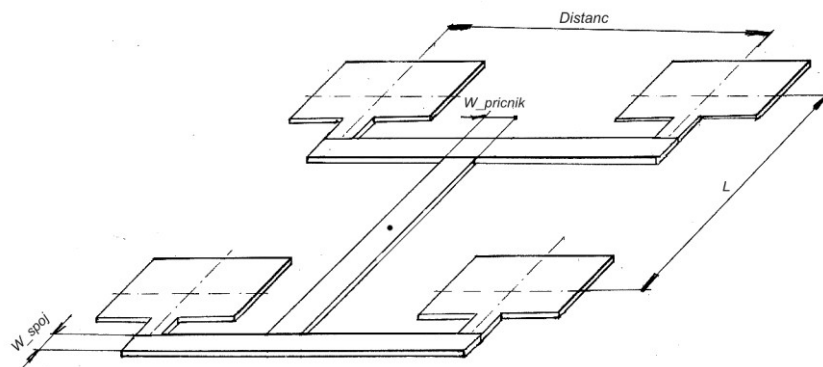
Protože máme flíčky navrženy s impedancí 100Ω , nemusíme do vedení v oblasti rozdělení signálu pro oba flíčky vkládat žádné další přizpůsobovací vedení, jenom se budeme snažit použitím optimalizační funkce dosáhnout, aby přímo použité vedení mělo požadované vlastnosti. Lze říci, že takto navržený tvar můžeme dále použít.

5.8.1. Zvětšení počtu prvků pro dosažení zisku 12 dB

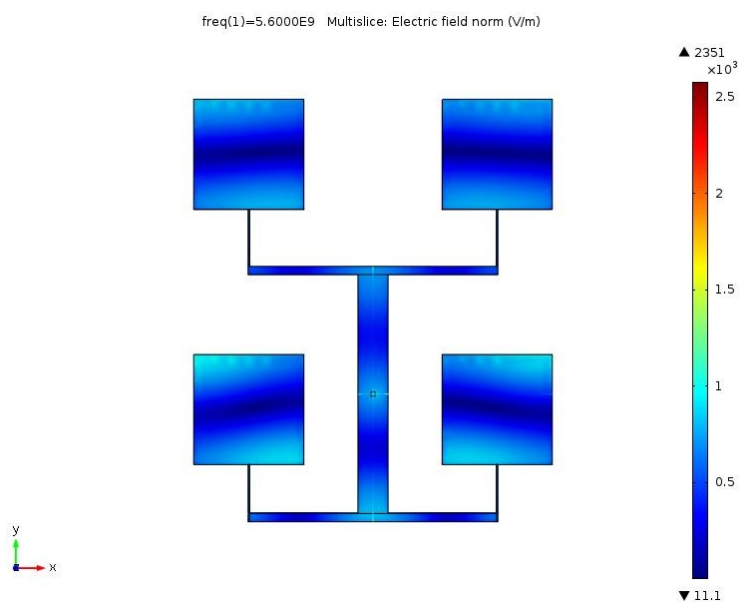
Přestože jsme dosáhli předpokládaného zisku pouze kolem 7 dB, pokusím se přidat další. V této chvíli volím řazení dle obrázku Obrázek 38. Jedná se o typické řazení prvků. Vzhledem

k impedanci soustavy budeme muset v místě napájení provést drobnou kompenzaci přizpůsobení, k tomuto se vrátíme ke konci práce.

Na obrázku Obrázek 37 vidíme uspořádání 4 flíčků mé antény do jednoho funkčního celku. Jsou zakótovány základní rozměry.



Obrázek 37 Rozložení prvků



Obrázek 38 Výsledné řazení prvků

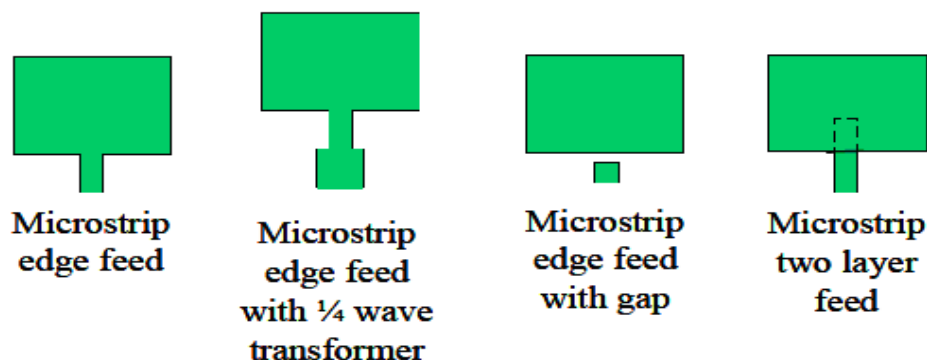
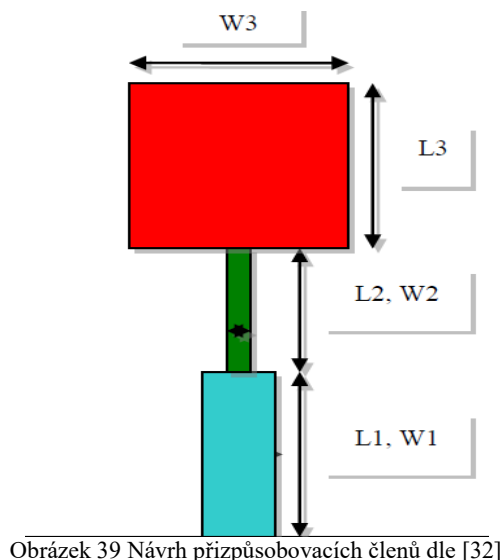
Výpočtem jsme zjistili hodnoty uvedené v tabulce Tabulka 7. Z uvedeného plyne, že anténa není optimálně nalaďena a proto nedosahuje maximálního možného zisku. Toto lze dále řešit impedančním členem ve vstupní části nebo optimalizací rozměrů spojovacího vedení.

freq (GHz)	LP impedance (Ω)	S_{11} (dB)	compl.intopl(emw.gainDBefar) (1)
5,60	49.228+49.521i	-5,8	10,6

Tabulka 7 Hodnoty před optimalizací

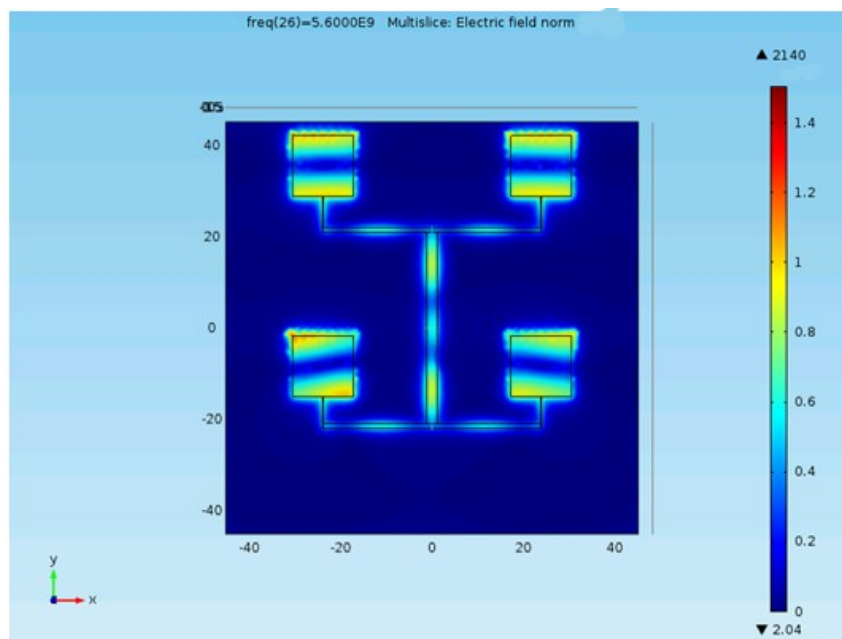
5.8.2. Kompenzace přizpůsobení systému antén

Provedeme optimalizaci šíře napájecího vedení, dodáme kompenzační plošky a provedeme celkovou optimalizaci antény. Na obrázku 39 je patrné rozmístění kompenzačních – přizpůsobovacích členů a jejich zapojení do vyzařovacího diagramu.



Obrázek 40 Možnosti řešení napájení a přizpůsobení antény [33]

Pole je u horních dvou flíčků rozloženo optimálně, u dolních dvou je mírně vychýlené vzhledem k ne zcela 100% symetrickému návrhu antény. Tato nepřesnost má vliv na směrovou charakteristiku a to tak, že budou rozdílné boční laloky, viz obrázek 41 níže. Dále model nabízí ještě další optimalizaci směrové charakteristiky a to zejména potlačení bočních laloků, potlačení zadních laloků a narovnání směrové charakteristiky. To však již přesahuje rozsah této práce. Oproti neoptimalizovanému návrhu došlo k výraznému zlepšení vyzařování flíčky a k potlačení nežádoucího vyzařování napájecími pásky. Napájecí vedení bude vyzařovat vždy, důležité je však jej přizpůsobit tak, aby neomezovalo vyzařování flíčků.



Obrázek 41 Finální design antény pro jednu polarizaci po kompenzacích

Funkce je uvedena níže, optimalizace probíhala metodou Nelder-Mead pro 50 kroků. Ze směrové charakteristiky je patrné, že již máme hlavní lalok výrazně zdůrazněný proti postranním lalokům, nicméně postranní laloky zůstávají stále veliké. Dále jsou přítomny dva silné zadní laloky. Směrová charakteristika je mírně frekvenčně závislá (natočení se mění s frekvencí) a zisk antény je frekvenčně závislý.

$$f_{minS_{11}} = abs(comp1.emw.S_{11}dB) \quad (5.15)$$

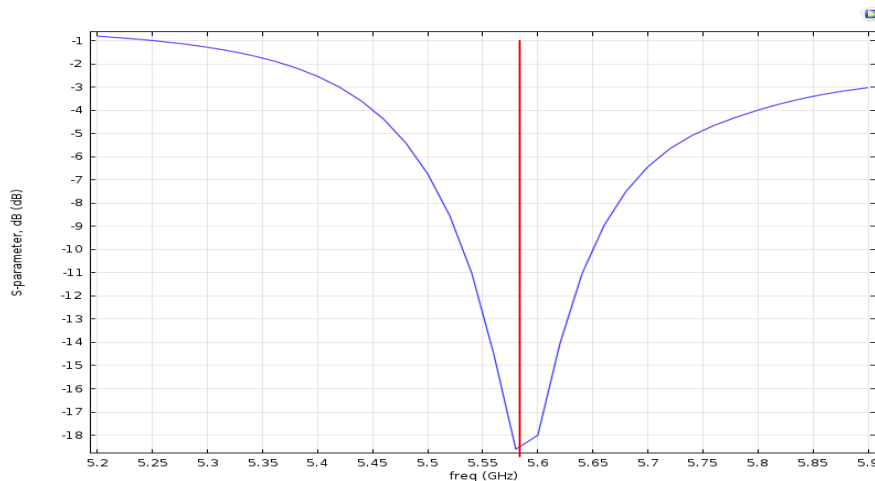
Proměnná	Počáteční hodnota [mm]	Minimální hodnota [mm]	Maximální hodnota [mm]
L _{st}	3	1	4
W _{patch}	20,73	15	22
W _t	3	2	7
L _t	5	2	7

Tabulka 8 Proměnné pro finální optimalizaci

V tabulce Tabulka 9 jsou uvedeny parametry antény po optimalizaci celého bloku.

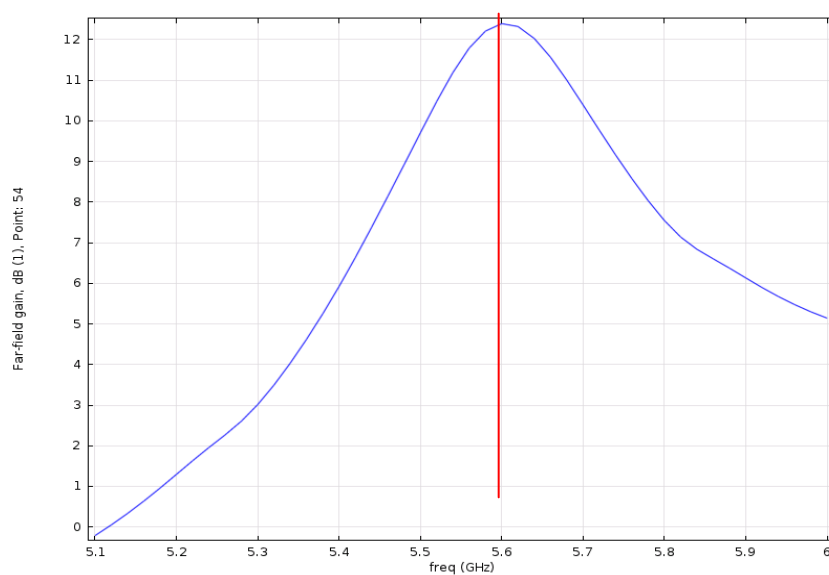
freq (Hz)	LP impedance (Ω)	S ₁₁ , dB (dB)	comp1.intop1(emw.gaindBefar) (1)
5,60E+09	46,297-11,755i	-18,04	12,966

Tabulka 9 Finální parametry designu jedné polarizace



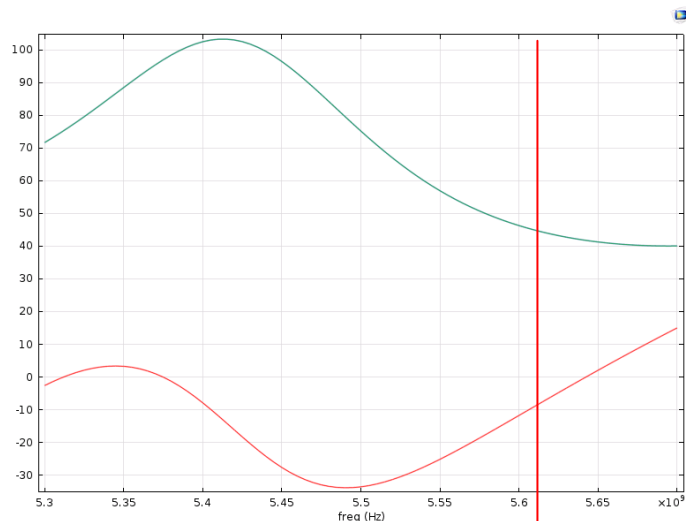
Obrázek 42 Simulace S_{11} v závislosti na frekvenci

Po optimalizaci se nám podařilo dosáhnout mírného rozšíření úzké špičky přizpůsobení.



Obrázek 43 Simulace zisku antény v závislosti na frekvenci

Anténa vykazuje dostatečné přizpůsobení na frekvenci 5,64GHz a dále předpokládám další lokální minimum kolem 4,8GHz což je mimo frekvenční rozsah zadání této práce. V dalším postupu se budu snažit toto minimum posunout do pracovní oblasti, kterou potřebujeme.



Obrázek 44 Průběh impedance napájecího portu, podrobný popis v textu

Z obrázku 44 jsou patrné hodnoty reálné (zelená křivka) i imaginární (červená křivka) složky impedance napájecího portu v závislosti na frekvenci. Je patrná oblast přizpůsobení i rezonance.

5.9. Přizpůsobení napájecího vedení

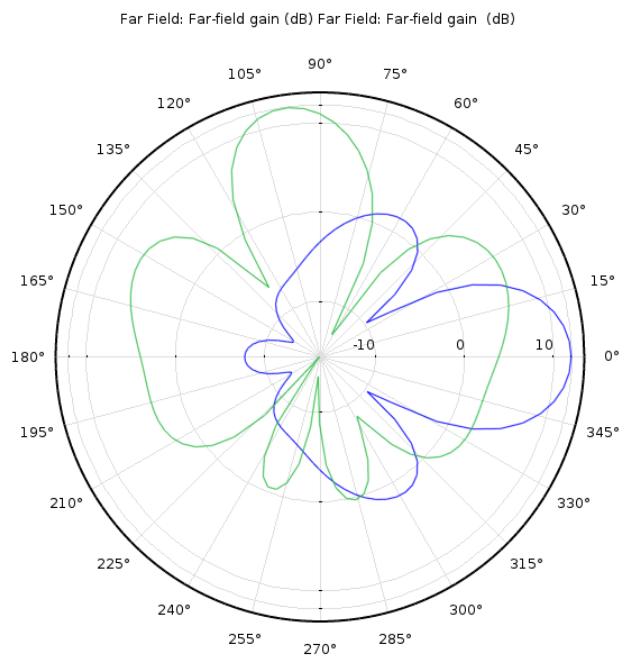
Při návrhu antény jsem předpokládal výsledné řazení flíčků do čtveřice, proto mám samostatné flíčky přizpůsobeny na impedanci 100Ω , tím jsem se vyhnul potřebě kompenzace napájecího vedení v místě spojení flíčků.

Jiná situace je ale v oblasti připojení antény na vlastní koaxiální vedení pomocí konektoru. Zde můžeme k problému přistoupit ze dvou pohledů. Můžeme vložit přizpůsobovací impedanční vedení, nebo se můžeme pokusit dosáhnout potřebné 50Ω impedance změnou velikosti příčky mezi dvojicemi a to jak šířkou, tak délkou. V modelu máme vložený přizpůsobovací prvek, avšak díky optimalizační funkci jej nemusíme využít. Jeho rozměry jsou tedy v konečném návrhu menší, nežli jsou rozměry středové příčky a proto se neuplatní.

5.10. Vložení vzduchové mezery mezi flíčky a zemnicí plochu

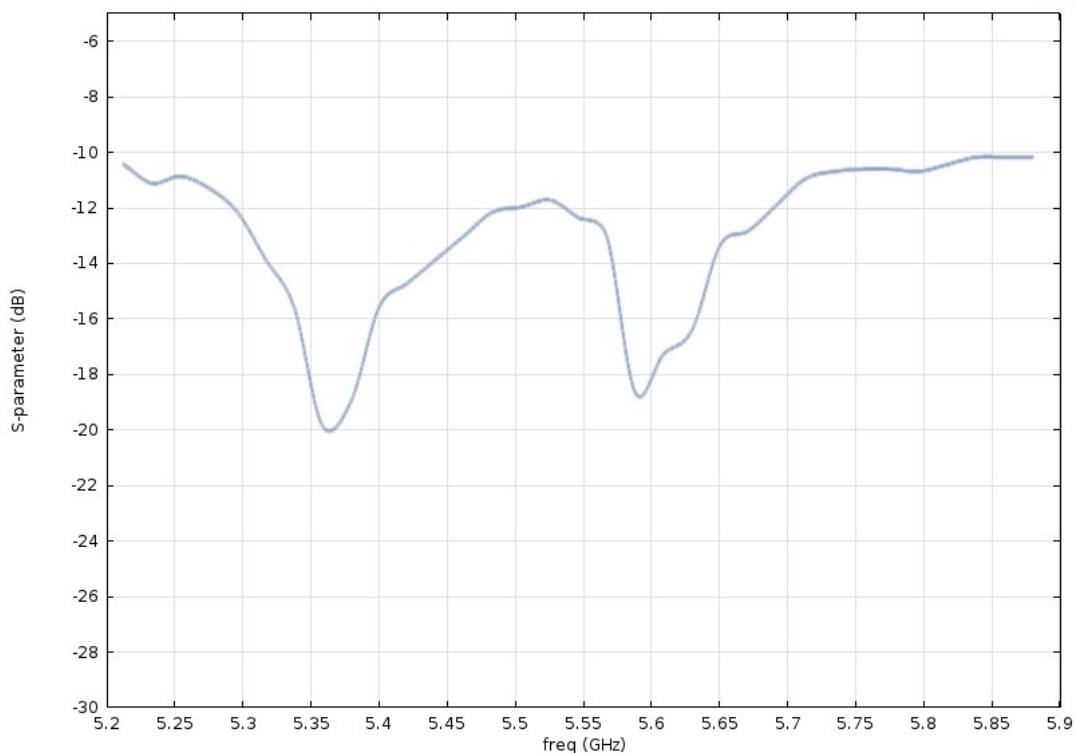
Hodnoty přizpůsobení horší nežli -10 dB lze považovat za neuspokojivé pro antény sloužící jako páteřní vysílače. Vhodnou další kompenzací rozměrů a uspořádání lze dosáhnout optimální hodnoty přizpůsobení kolem -20 dB v celém pracovním rozsahu. Protože je pro nás důležité popsat metodu optimalizace, budeme za postačující přizpůsobení považovat -10 dB v celém pracovním rozsahu a zisk alespoň 4 dB, tak jak je v zadání práce.

Lepšího přizpůsobení lze dosáhnout vložení vzduchové mezery mezi flíčky a zemnicí plochu [19]. Optimalizaci podle šíře vzduchové mezery a zároveň opět i vzdáleností prvků provádíme metodou Nelder-Mead s omezením constraints nastaveným na -12 dB v požadovaném frekvenčním pásmu, s omezením rozšířeným Lagrangianem a s $\rho=10$. Hodnotu -12 dB volíme s rezervou vzhledem k možným nepřesnostem v modelu.



Obrázek 45 Směrová charakteristika antény

Obrázek 45 znázorňuje směrovou charakteristiku antény, je vidět maximální dosažený zisk 12,04 dB a symetrické rozložení elektrického pole kolem osy – modrá křivka. Zeleně je znázorněno rozložení magnetického pole. V obou charakteristikách jsou patrné výrazné boční laloky.



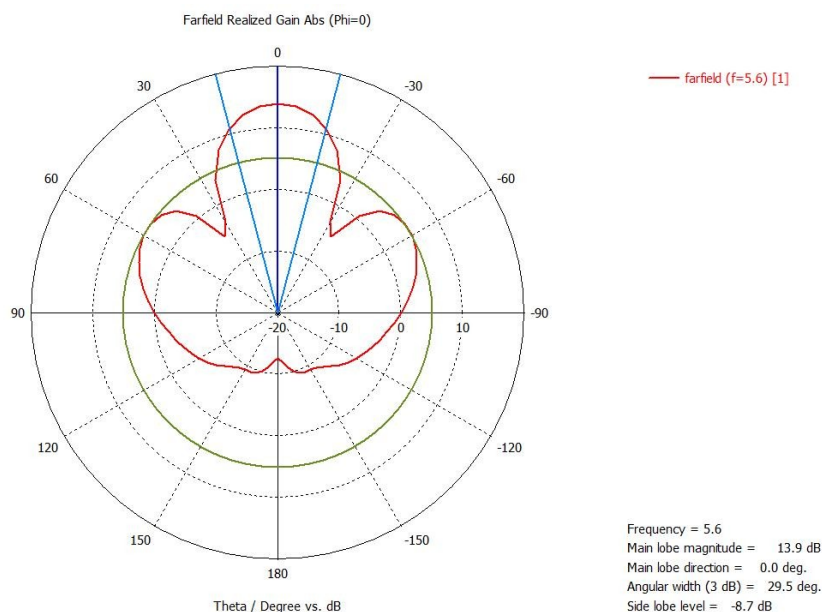
Obrázek 46 Přizpůsobení finálního designu antény

Obrázek 46 ukazuje přizpůsobení finálního designu antény v závislosti na frekvenci. Je patrné, že průběh má dvě lokální minima na frekvenci přibližně 5,38GHz s hodnotou -20 dB a 5,58GHz s hodnotou -18,5 dB. Protože je dosaženo kritéria -10 dB v celém požadovaném pracovním rozsahu, nemusím toto dále řešit a optimalizaci i celkový design antény mám hotový.

Optimalizační funkce nám měla za cíl v průběhu výpočtu zlepšit hodnotu přizpůsobení v celém požadovaném frekvenčním rozsahu na hodnotu alespoň -10 dB. Toto lze považovat za splněné.

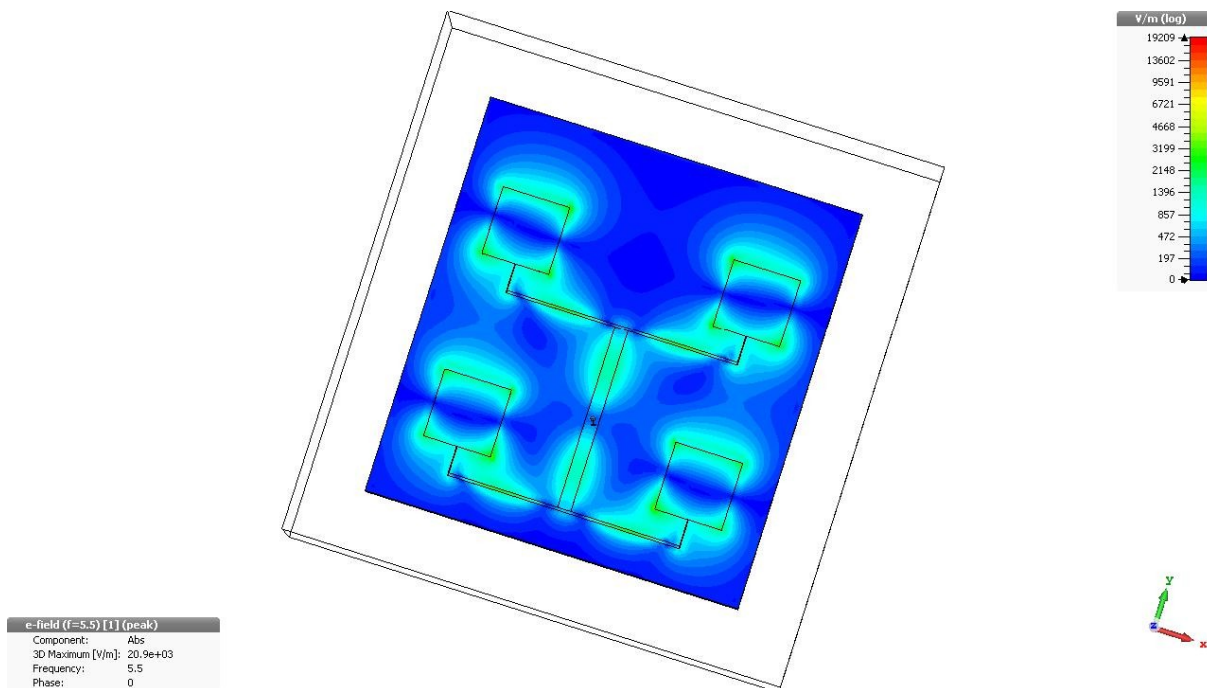
5.11. Simulace v CST studiu

V průběhu vypracování mé práce zakoupila škola program CST studio, který je primárně určen pro návrh antén různých typů, například [36]. Proto se jako logické řešení nabízelo porovnat výstupy, které poskytuje Comsol Multiphysics a CST studio, avšak bez hlubšího zkoumání použitých optimalizačních metod výpočtu CST studií a bez zkoumání a výpočtu jednotlivých kroků.



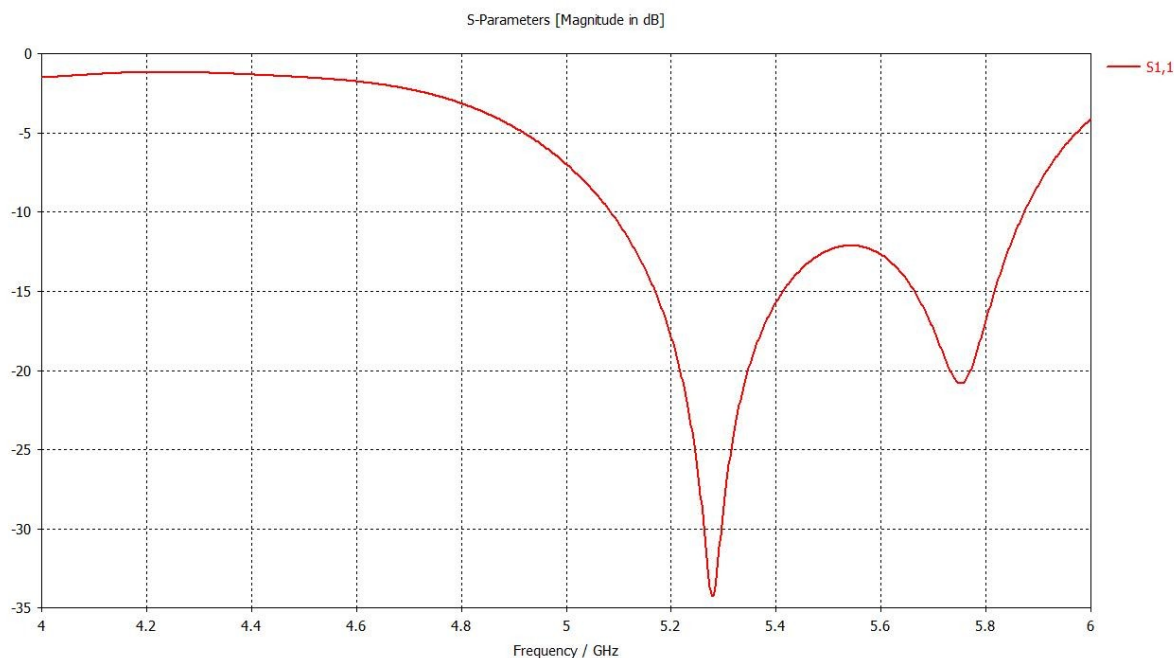
Obrázek 47 Směrová charakteristika v CST Studiu

Obrázek 47 zobrazuje směrovou charakteristiku simulace v CST studio. I z této simulace je patrné, že anténa dosahuje zisku kolem 13 dB na frekvenci 5,6GHz, při současném vyzařovacím úhlu 29,5° pro pokles signálu o 3 dB. Na rozdíl od Comsolu zde vidíme symetrický průběh zadního laloku i celé charakteristiky. Jako orientační potvrzení výpočtu nám toto postačuje, kompletní model je na příloženém CD v adresáři CST a jsou na něm k dispozici i data pro ostatní frekvence.



Obrázek 48 Rozložení intenzity elektrického pole v CST Studiu

Obrázek 48 nám ukazuje rozložení intenzit elektrického pole v simulaci CST studiem. Vidíme obdobné rozložení, jako nám poskytuje Comsol, včetně vyzařování napájecím vedením.



Obrázek 49 Parametry S11 v CST Studiu

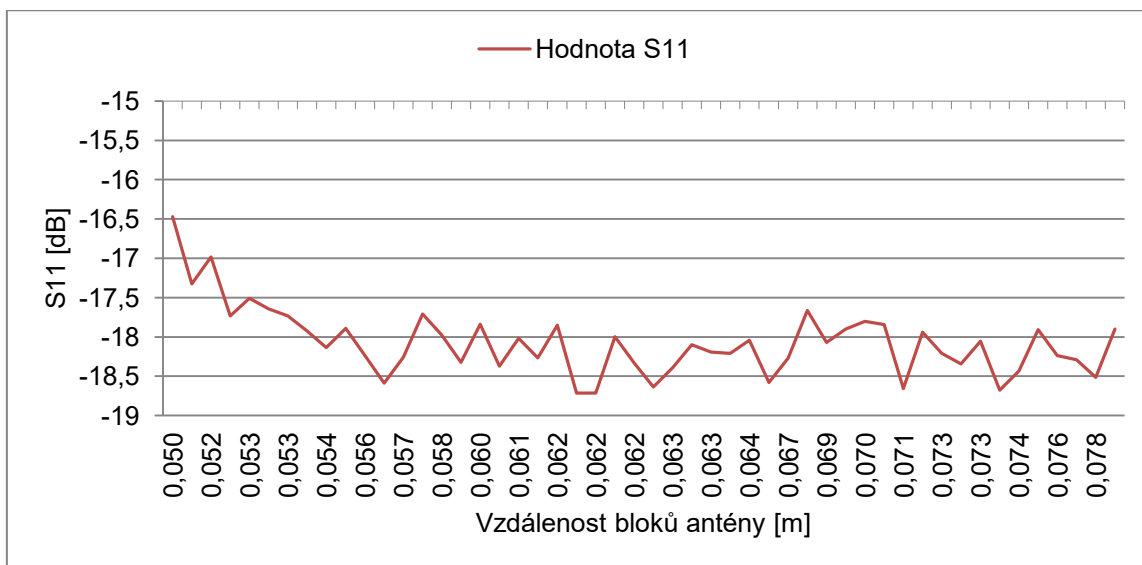
Obrázek 49 nám zobrazuje průběh S_{11} v závislosti na frekvenci. Protože CST studio provádí simulace mnohem rychleji nežli Comsol, nechal jsem zpracovat graf v širším rozsahu frekvencí 4-6GHz. Opět vidíme dvě lokální minima, tentokrát na frekvenci 5,28GHz a 5,78GHz. Což znamená, že se výpočet mírně liší. Dle simulace v CST studiu by měla mít

anténa mírně lepší hodnoty přizpůsobení, nežli hodnoty získané programem Comsol. Simulace v CST potvrdila správnost dat z Comsolu.

5.12. Optimalizace umístění druhého bloku

V dalších simulacích se budeme zabývat vzájemnou polohou dvou bloků antén vůči sobě. Nejprve provedeme vyhodnocení vlivu umístění druhého funkčního bloku na parametr S_{11} bloku prvního.

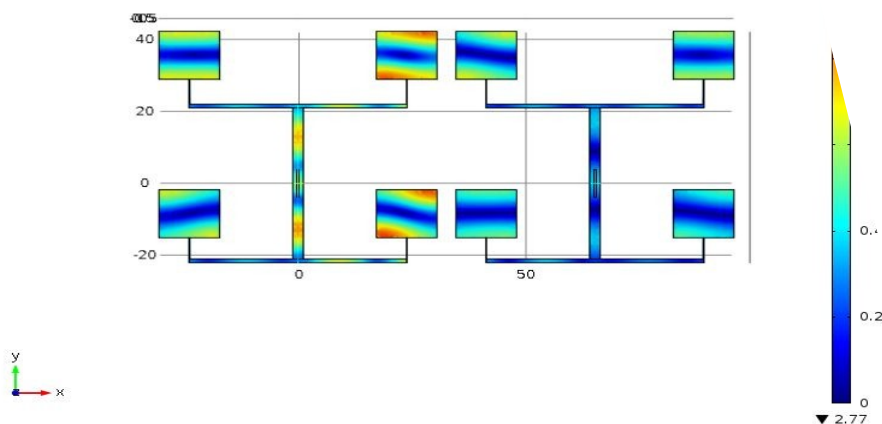
Obrázek 50 ukazuje vliv hodnoty S_{11} na vzdálenosti prvků.



Obrázek 50 Vliv vzdálenosti antén na parametr S_{11}

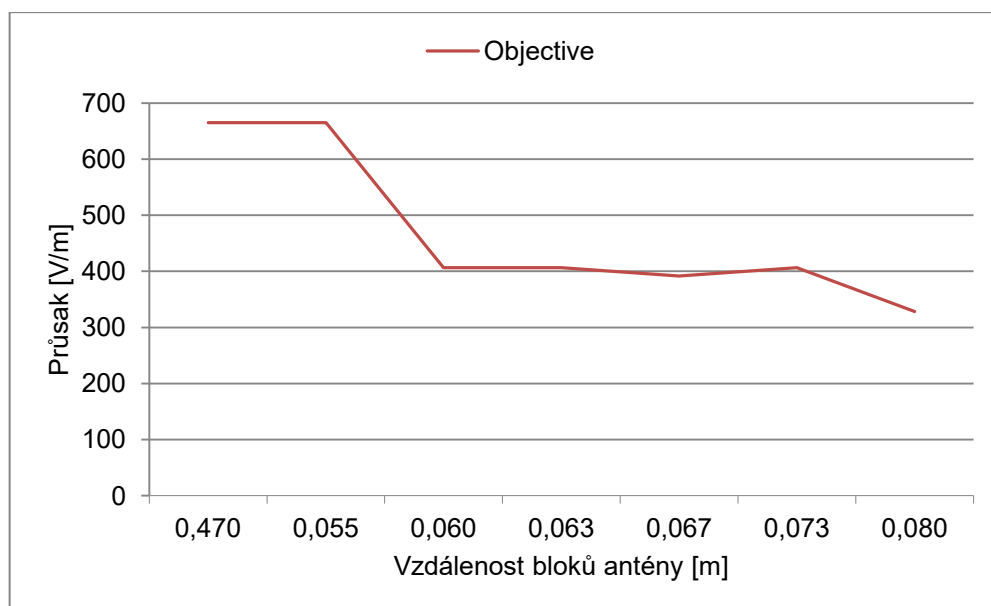
Je patrné, že pokud umístíme středy prvků od sebe přibližně na vzdálenost vlnové délky, velikost ovlivnění již příliš ve sledovaném intervalu $\langle \lambda, 2\lambda \rangle$ se téměř nemění.

freq(1)=5,6000E9 Multislice: Electric field norm (V/m)



Obrázek 51 Rozmístění prvků po optimalizaci dle S_{11}

Napájený flíček je umístěn vpravo. Z obrázku 51 a obrázku 51 je patrné, že průsak do sousedního flíčku je již minimální.

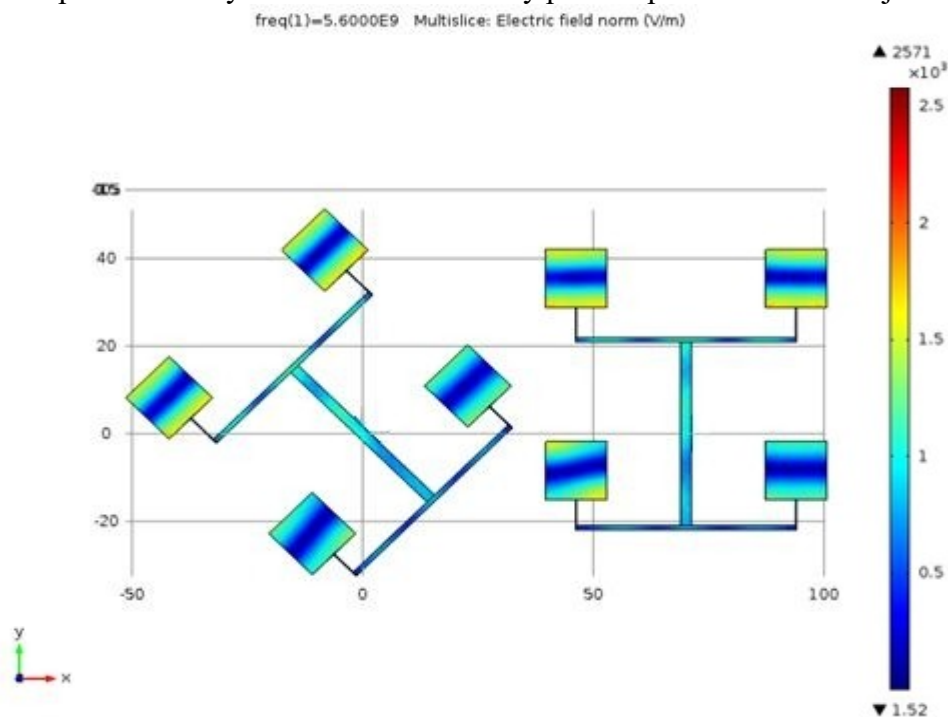


Obrázek 52 Vliv vzdálenosti prvků na průsak signálu do sousedního systému

Z obrázku 52 je opět patrné, že minimální vhodná vzdálenost krajů antény je o velikosti vlnové délky, pak již dochází k pozvolnějšímu poklesu průsaku.

Natočení druhého bloku

Obrázek 53 s optimalizovaným rozložením intenzity pole na povrchu substrátu je níže.



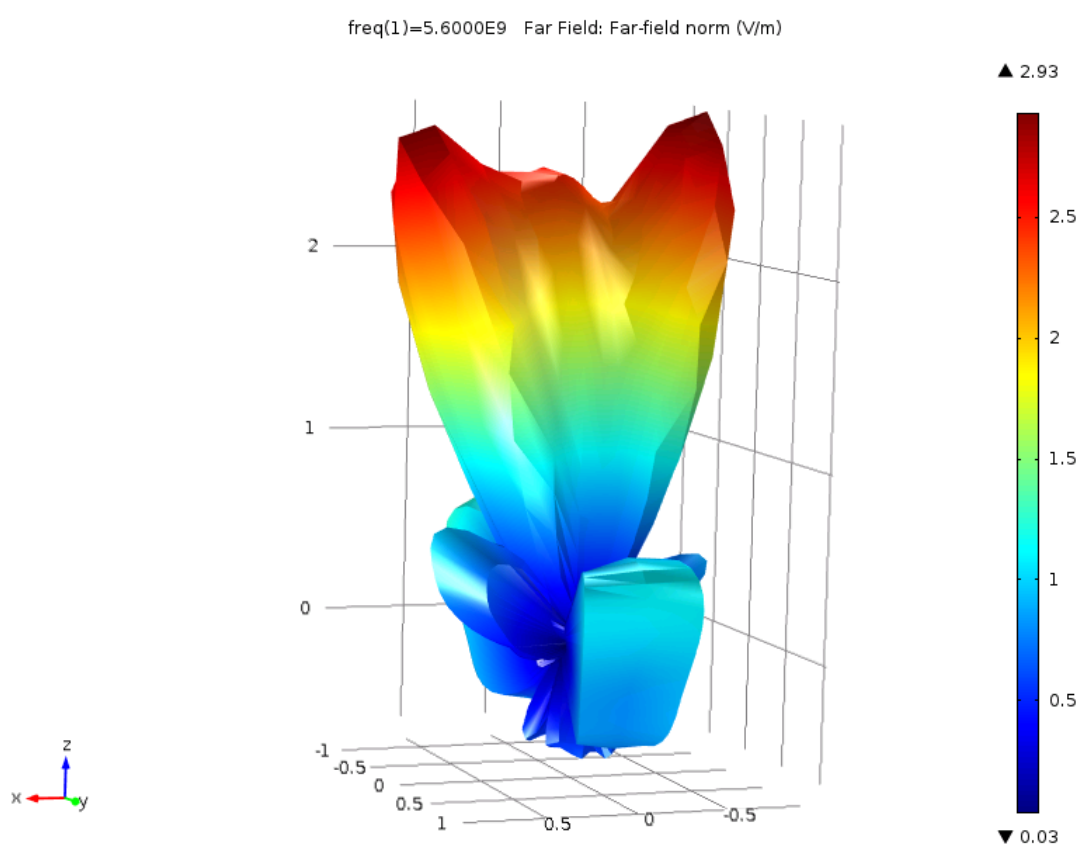
Obrázek 53 Natočení druhého flíčku o 45°

V této simulaci zkoumáme vliv natočení druhého bloku antény na průsak signálu. Hodnota natočení – úhel alfa se bude měnit v rozsahu 0° až 90° .

Protože jsme při simulaci zjistili výrazné ovlivnění sousedního bloku, budeme celkový vliv natočení řešit až v konfiguraci 3x3.

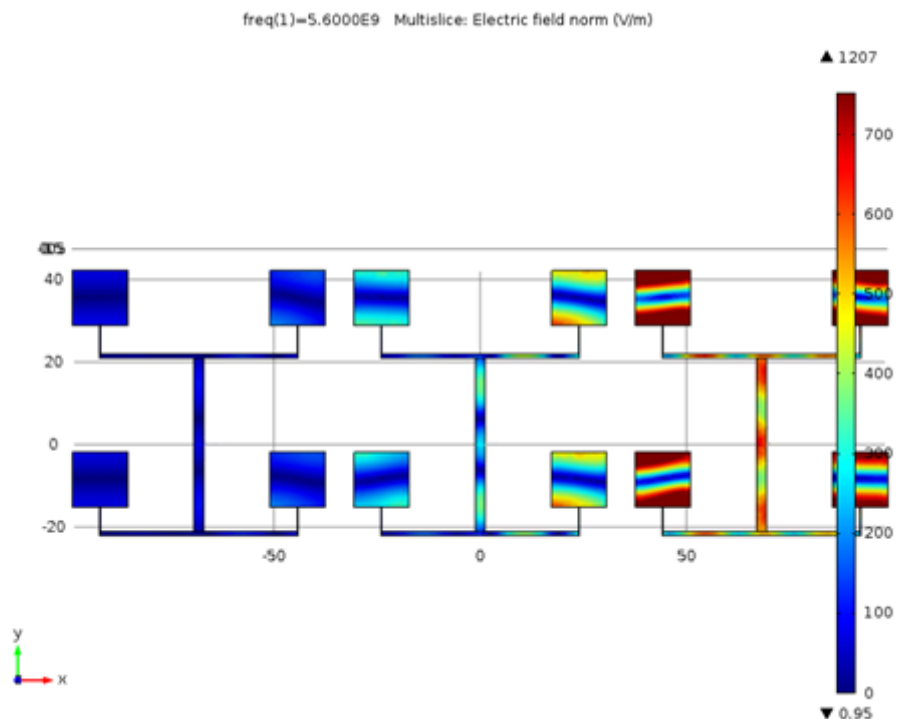
5.13. Konfigurace 3x3

V této části práce se budeme věnovat simulaci průsaku signálu do sousedního flíčku při konfiguraci 3x3 se středovým flíčkem v souhlasné (vertikální) polarizaci a v případě, že středový flíček bude vůči krajním pootočen.



Obrázek 54 Vyzařovací diagram 3x3 ve 3D

Na obrázku Obrázek 54 vidíme směrovou charakteristiku pro uspořádání 3x3 se shodnou polarizací všech tří prvků.



Obrázek 55 Rozložení intenzity el. pole na flíčcích 3xV

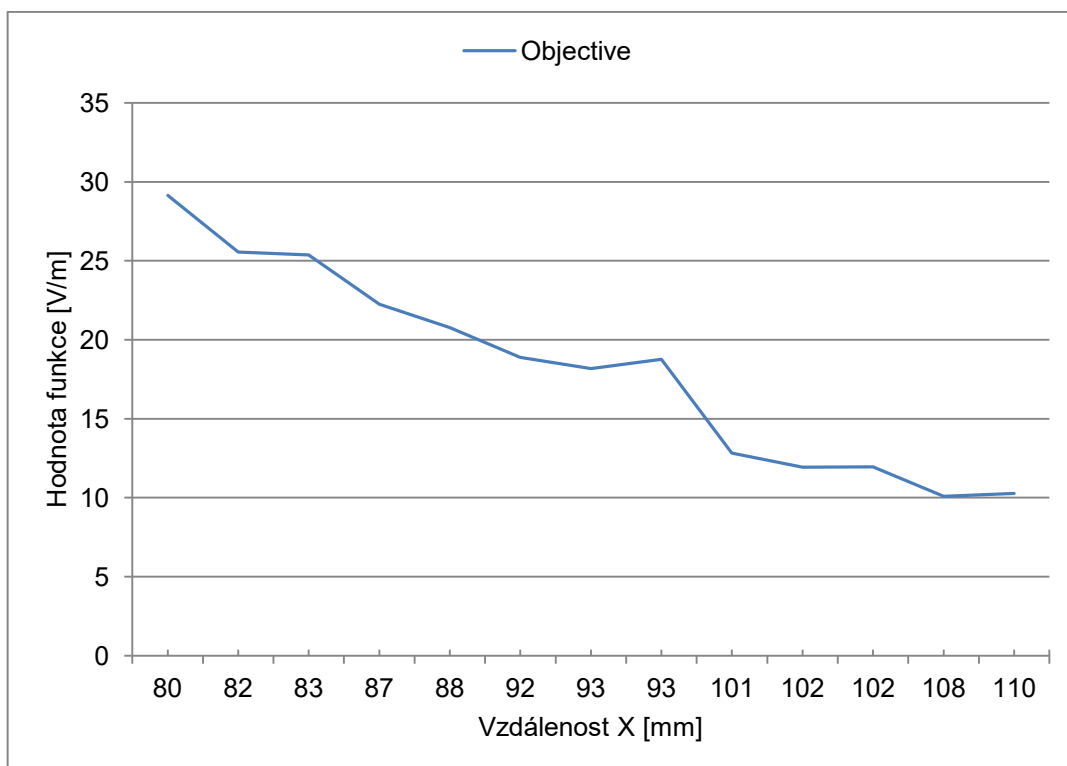
Závislost průsaku signálu na vzdálenosti

V simulaci budeme zjišťovat závislost průsaku na vzdálenosti druhého flíčku. Zkoumaná vzdálenost je 80 – 110 mm, protože vzhledem k budoucímu natočení je nutno nechat mezi prvky větší rozestup. Tabulka 10 uvádí simulované hodnoty a Obrázek 56 zobrazuje průběh poklesu signálu.

vzdálenost [mm]	Objective [V/m]
80,363	29,14
82,43	25,54
82,529	25,38
86,654	22,25
88,405	20,77
91,981	18,89
92,715	18,17
92,975	18,76
101,32	12,83
101,84	11,94
102,03	11,96
107,77	10,09
110	10,28

Tabulka 10 Závislost průsaku na vzdálenosti

Při tomto uspořádání jsme dosáhli minimum průsaku signálu ve vzdálenosti středů 107,77 mm

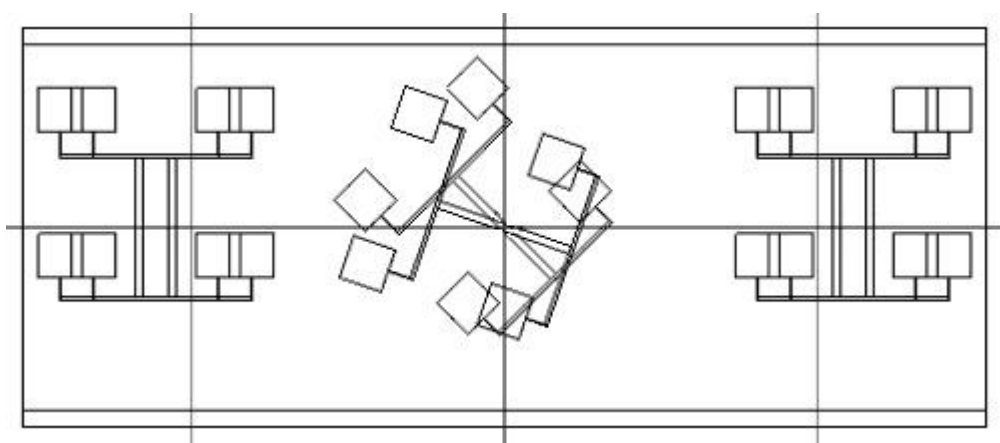


Obrázek 56 Závislost průsaku do vedlejšího flíčku na vzájemné vzdálenosti prvků

Je patrný v podstatě lineární pokles průsaku s jedním extrémem v oblasti 93mm. Data poskytuje po správném sestavení funkce přímo Comsol Multiphysics.

5.14. Závislost průsaku na natočení

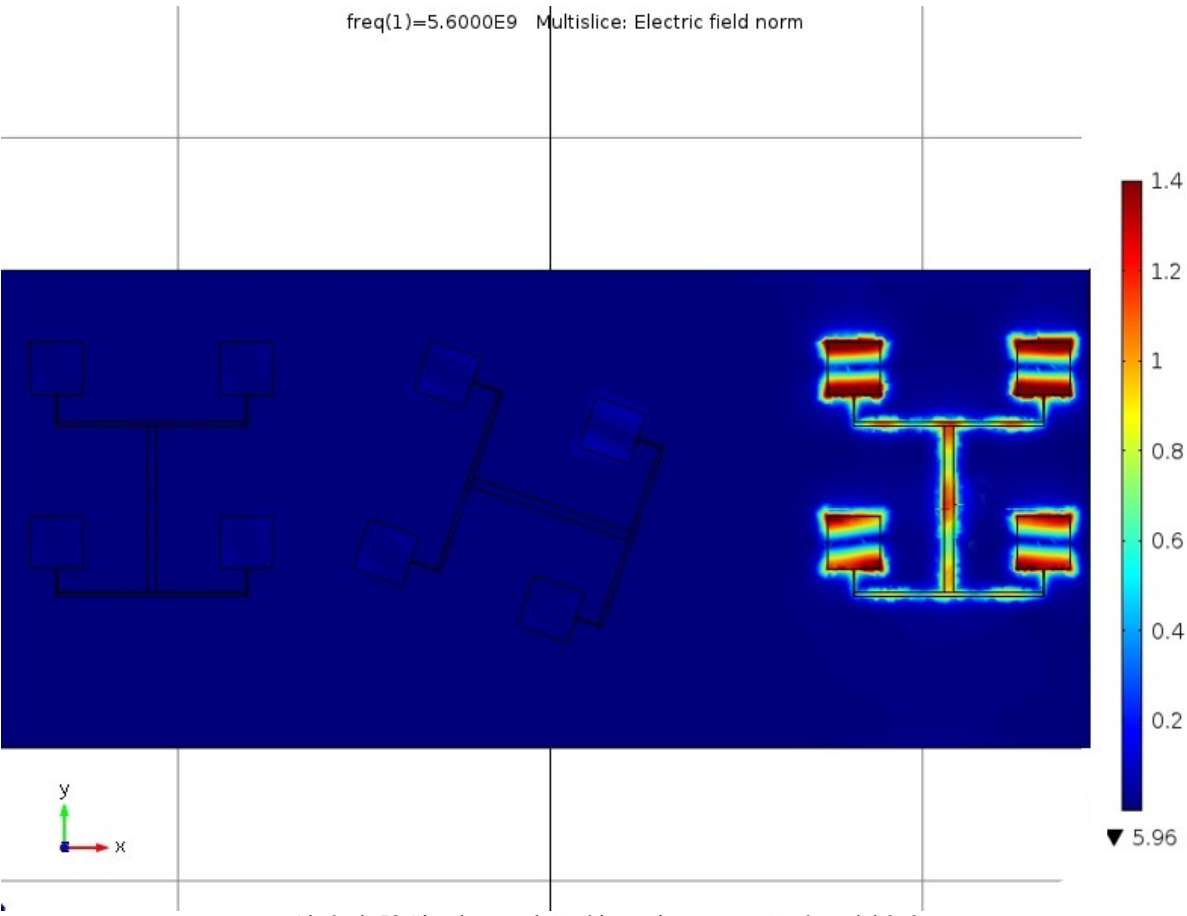
Obrázek 57 zobrazuje uspořádání antén pro testování průsaků u rozmístění v konfiguraci 3x3, kde zjišťujeme optimální vzdálenost mezi jednotlivými segmenty a úhel natočení středového a krajního segmentu.



Obrázek 57 Optimalizované polohy

Optimalizace probíhá opět metodou Nelder-Mead podle (5.13), kde hledáme minima funkce na daném intervalu 0° až 180° . Pokud bychom měli model souměrný podle osy x a y stačilo by

zkoumat v rozsahu 0° až 90° . Jako výchozí vzdálenost mezi anténami mám hodnotu 107,7mm.



Obrázek 58 Simulace rozložení intenzity pro natočený model 3x3

Na obrázku Obrázek 58 vidíme rozložení intenzity elektrického pole na vysílací anténě, nepatrné ovlivnění středové antény a téměř žádný průsak na třetí sestavu. Obrázek znázorňuje uspořádání 2x vertikální polarizace s natáčeným středovým prvkem.

alfa [rad]	Objective
0,0000	23,88
0,1542	13,22
0,0075	23,35
0,6551	10,71
0,8076	12,49
0,7635	8,25
1,23	7,74

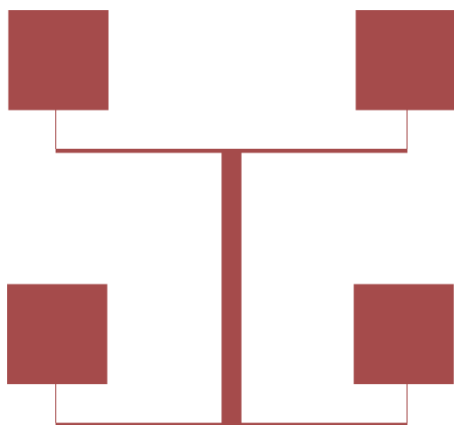
Tabulka 11 Závislost průsaku na úhlu natočení

Minimum průsaků do sousedních flíčků jsme zjistili při natočení středového bloku o 1,23rad což odpovídá přibližně 71° . Původní předpoklad natočení o 45° je ovlivněn nesymetrickou konstrukcí antény.

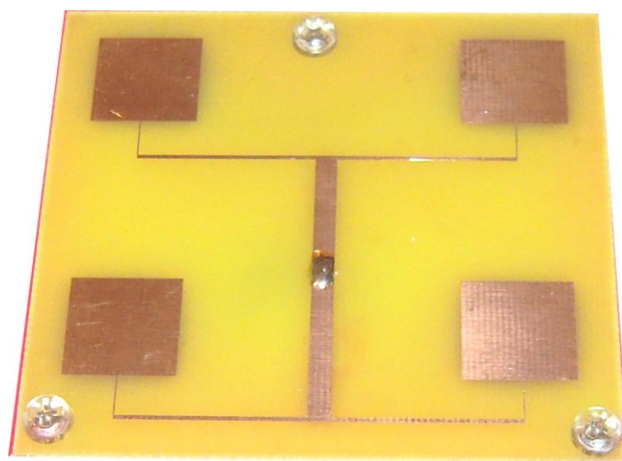
Největšího vzájemného potlačení signálu dosáhneme kombinací vertikální, natočené a horizontální polarizace. Tímto můžeme považovat body 3 a 4 zadání práce za splněné.

6. PRAKTICKÁ REALIZACE

Design antény jsem nakreslil v programu Eagle a anténu jsem vyrobil na substrátu FR4 fotocestou. Produktový list s vlastnostmi substrátu je v příloze. Desku jsem vyrobil v 6 ti kusech tak, abych měl na měření vždy 3 samostatné díly a měřil jsem vliv vzdálenosti antén na parametr S_{11} .



Obrázek 59 Výsledný design



Obrázek 60 Vyrobená anténa

Pro napojení antény jsem zvolil běžně dostupný konektor pro RF aplikace SMA, upevněný pájením na zadní straně antény. Napájení přes vzduchovou mezeru jsem propojil vodičem stejného průměru jako je středový pin v konektoru a vyvedl jej na horní stranu desky. Volba vhodného konektoru je naprosto zásadní záležitostí pro správnou funkci antény. V případě použití nevhodného konektoru nemusí anténa dosahovat požadovaných parametrů, případně je nutno vlastnosti kompenzovat jako například v [37].

Vzhledem ke krátkému času, který jsem měl k dispozici ve VUS, jsem musel co nejlépe sestavit anténu již v Ostravě. Změnou, která měla vliv na vlastnosti antény bylo nastavení vzdálenosti plošek antény od zemnicí plochy. Toto jsem prováděl pomocí plastových (elektricky i magneticky nevodivých) šroubů, kde postupným zašroubováním jsem dosahoval změny vzdálenosti od zemnicí plochy. Dále jsem měl na šroubech navlečeny plastové bužírky, které prováděly protitlak a udržovaly rozteč mezi deskami konstantní. Takto jsem nastavil optimální parametry přizpůsobení a s již hotovou sestavou jsem prováděl měření ve Výzkumném Ústavu Spojov n.o. Banská Bystrica v prosinci 2016.

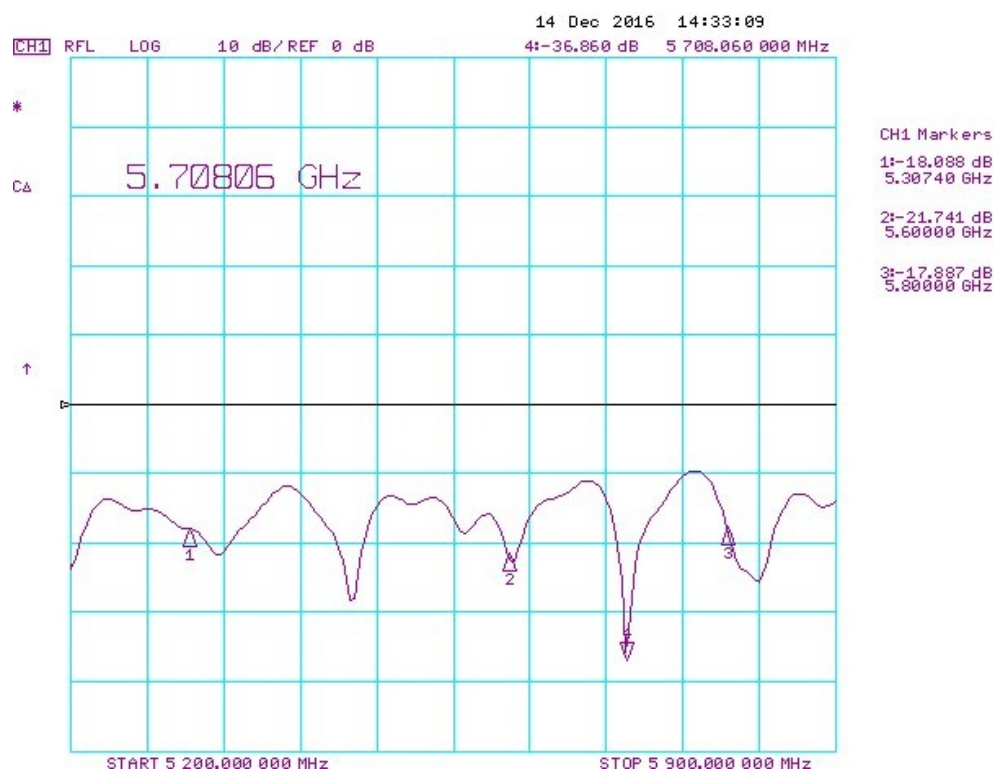
Anténu jsem po vyrobení poskládal dle popisu výše a orientačně měřil ve vlastní laboratoři pomocí generátoru signálu HP 8350B s RF jednotkou 2,4-8GHz a skalárního analyzátoru HP8756A a potřebných kabelových redukcí a rozbočovače signálu Narda. Poté jsem jel provést měření do bezodrazové komory ve VÚS n.o. Banská Bystrica.

Měřicí přístroj ve VÚS n.o. byl použit spektrální analyzátor Agilent HP 8753ET, výrobní číslo US39170511 s kalibrací platnou do roku 2017. VUS n.o. udává u komerčních měření celkovou odchylku maximálně 2 dB což i s ohledem na závěry v [29] a [34] je hodnota

postačující. Hodnoty zjištěné oběma měřeními korelovaly s předpokladem. Oproti simulaci byly parametry mírně zhoršené, což přisuzuji ne zcela optimálním vlastnostem substrátu FR4, konektoru a výrobní toleranci.

6.1. Měření činitele odrazu vyrobené antény

Vidíme, že anténa je přizpůsobena na frekvenci 5,7GHz a to na hodnotu -36,8dB. V předpokládaném pracovním rozsahu 5,3-5,8GHz je přizpůsobení lepší nežli -10 dB, což lze považovat za uspokojivé a produkčně použitelné, avšak za dále optimalizovatelné. Toho lze dosáhnout uspořádáním napájecího portu, řešením přechodu přizpůsobení kabel – konektor - substrát. Marker 1 je na frekvenci 5,3GHz s hodnotou -18 dB, marker 2 je na frekvenci 5,6GHz s hodnotou -21,7 dB a marker 3 je na frekvenci 5,8GHz s hodnotou -17,8 dB. Jak si popíšeme dále u měření zisku, anténa je proti výpočtu mírně frekvenčně posunutá.



Obrázek 61 Přizpůsobení vyrobené antény na analyzátoru

6.2. Zisk antény

Zisk antény jsme měřili komparační metodou s kalibrovanou anténou s předem známými vlastnostmi. Jako referenční antény byly použity kalibrované antény o zisku 10 dB s kalibračními body mimo jiné v hodnotách 5GHz, 5,5GHz a 6GHz. Naše vyrobená anténa dosahuje v celém sledovaném pásmu 5,3GHz až 5,8GHz minimálně 4 dB zisku dle zadání. Maximálního zisku dosahuje anténa na frekvenci 5,37GHz a to hodnoty 12,72 dB, což znamená oproti předpokladům ze simulace posun o 300MHz směrem dolů, ale při zachování předpokládaného maximálního zisku. V krajní frekvenci 5,3GHz je zisk 11,46 dB – označeno

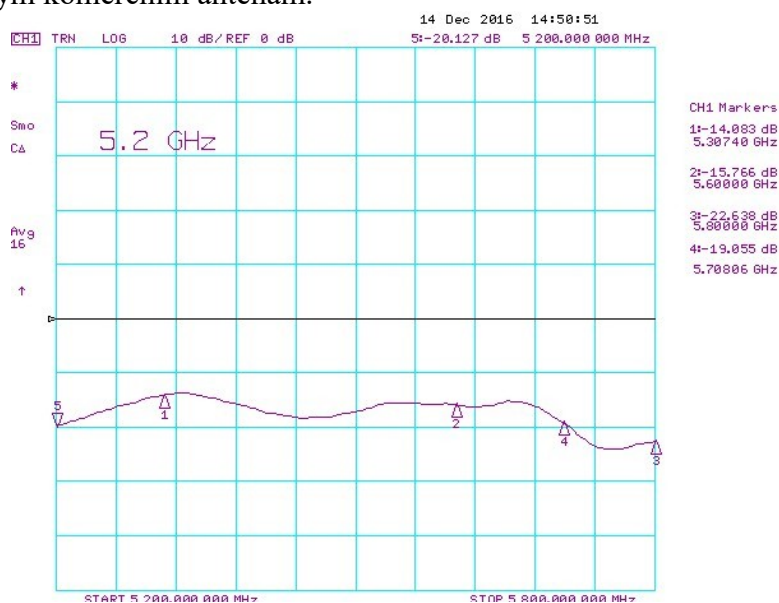
markerem 1 a na frekvenci 5,8GHz – marker 3 stále dosahuje hodnotu zisku okolo 7 dB. Lze říct, že anténa dosahuje hodnot předpokládaných simulací. Pokud bychom zvažovali komerční sériovou výrobu, museli bychom dále zohlednit vliv rozptylu parametrů substrátu na vlastnosti antény. FR4 má udávanou hodnotu ϵ_r v rozmezí 4,4 – 4,6. Což je přibližně 5% a tento rozptyl může i vzhledem ke změnám křivky na obrázku 70 způsobovat sledované frekvenční posunutí.



Obrázek 62 Zisk antény

Potlačení signálu při opačné polarizaci.

Pro naše srovnání jsem ještě měřil zisk antény při otočení s opačnou polarizací. Výsledek je na obrázku Obrázek 63. Vidíme, že potlačení signálu dosahuje hodnoty -14,08dB na frekvenci 5,3GHz a nejlepší hodnoty -22,63dB dosahuje na frekvenci 5,8GHz. Tyto hodnoty odpovídají běžně dostupným komerčním anténám.



Obrázek 63 Potlačení signálu při opačné polarizaci

6.3. Směrová charakteristika vyrobené antény

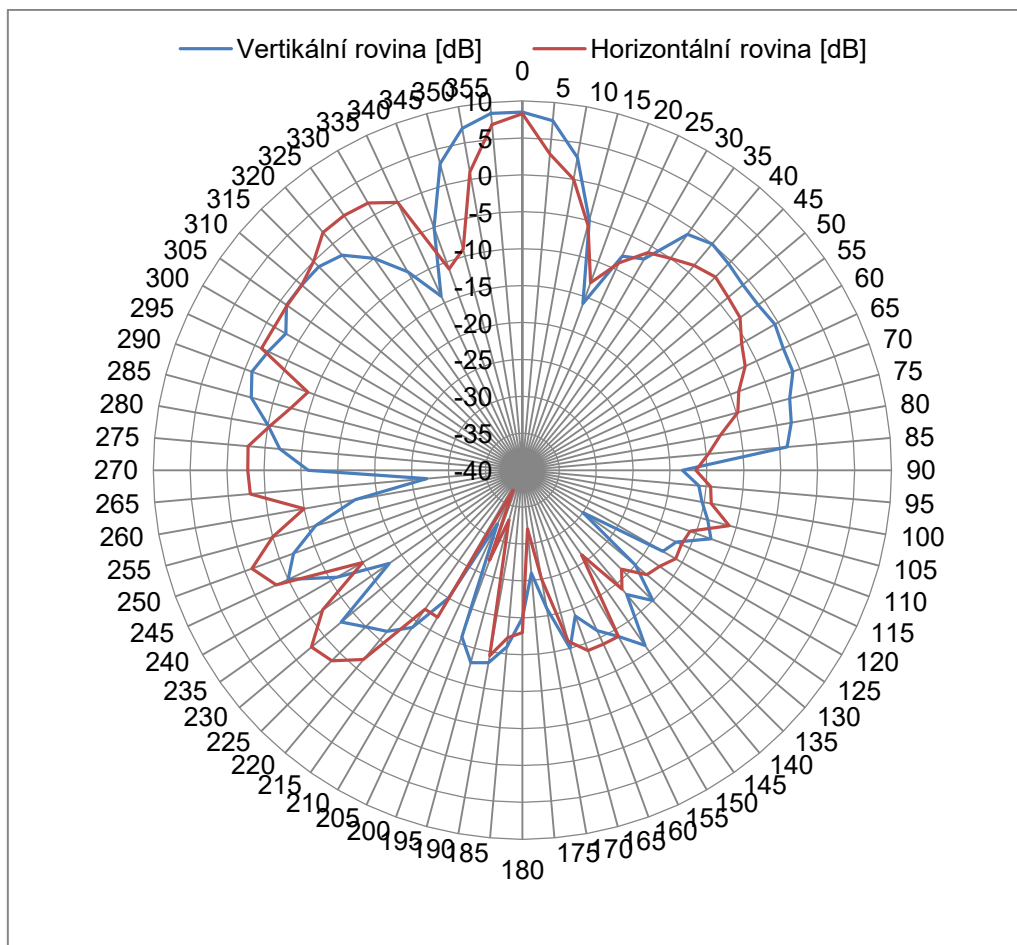
Směrovou charakteristiku jsme měřili na točně v bezodrazové komoře s krokem 5° . Data jsou uvedena v příloze.

Realizované měření nám potvrzuje simulaci směrové charakteristiky, anténa má dva výrazné postranní laloky. Oproti simulacím má zhoršené vlastnosti v rozsahu 210° až 260° , kde vykazuje větší zisk nežli na simulacích. Další optimalizace před výrobou by zahrnovaly potlačení bočních laloků, úpravu designu pro potlačení signálu ze zadního směru - předozadního poměru a v případě potřeby další úpravy směrové charakteristiky ve prospěch co nejúžšího hlavního laloku.



Obrázek 64 Měření v bezodrazové komoře VUS

Snímek měřicího pracoviště z bezodrazové komory VUS Banská Bystrica, v pozadí na stole je referenční anténa.



Obrázek 65 Vyzářovací charakteristika antény změřená

6.4. Průsaky signálu do sousedních flíčků

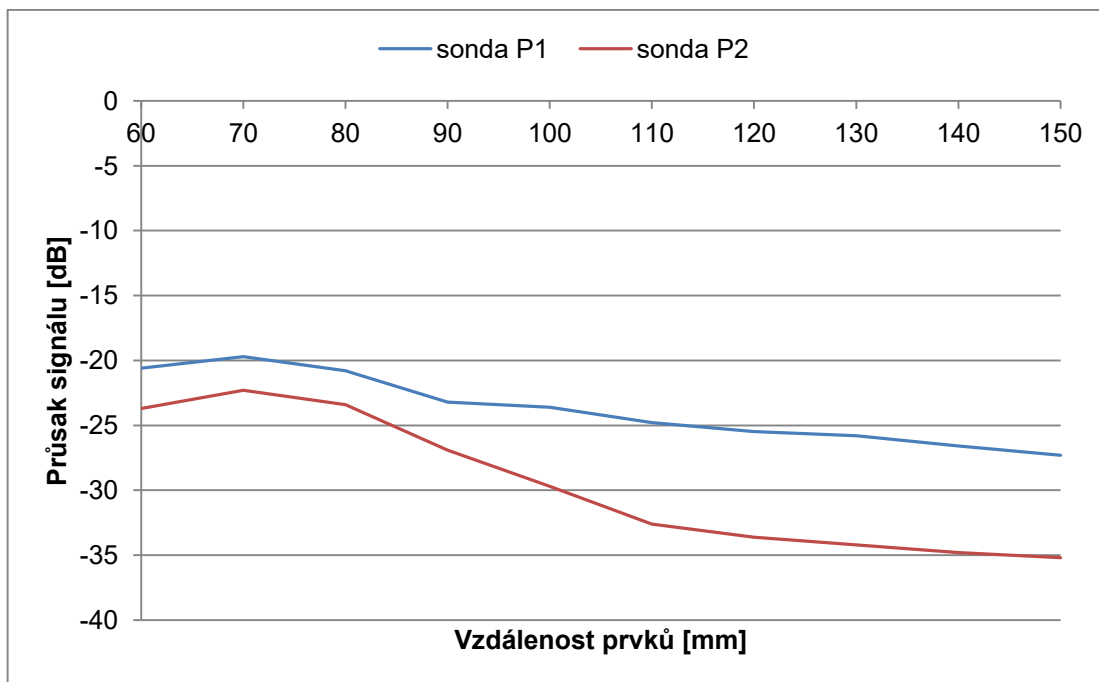
Souměrné uspořádání s využitím stejné vertikální polarizace pro celou sestavu.

Vzhledem k mechanickým rozměrům měření probíhalo ve vzdálenosti středů 60mm až 150mm.

L [mm]	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
P1 [dB]	-20,6	-19,7	-20,8	-23,2	-23,6	-24,8	-25,48	-25,8	-26,6	-27,3
P2 [dB]	-23,7	-22,3	-23,4	-26,9	-29,7	-32,6	-33,62	-34,2	-34,8	-35,2

Tabulka 12 Průsak signálu do vedlejšího flíčku V+V+V

Tabulka 12 nám společně s obrázkem Obrázek 66 ukazuje skutečně naměřené hodnoty průsaku signálu do sousedního flíčku. Všechny prvky jsem uspořádal v jedné stejné polarizaci. Prvek A byl vzdálen od vysílače o vzdálenost L, prvek B byl vzdálen od vysílače o vzdálenost dvojnásobku délky L tak, abychom dodrželi symetrické rozložení prvků.



Obrázek 66 Průsak signálu pro uspořádání 3xV

Naměřený průsak signálu nám svým průběhem potvrzuje hodnoty zjištěné výpočtem. U sondy P1 vidíme rovnoměrný pokles od vzdálenosti přibližně 90mm a dále. U sondy P2, která je vzdálenější vidíme výraznější pokles ve vzdálenosti odpovídající přibližně dvojnásobku vlnové délky. Ve vzdálenosti 130mm a dále už změna hodnoty poklesu úrovně signálu není tak výrazná.

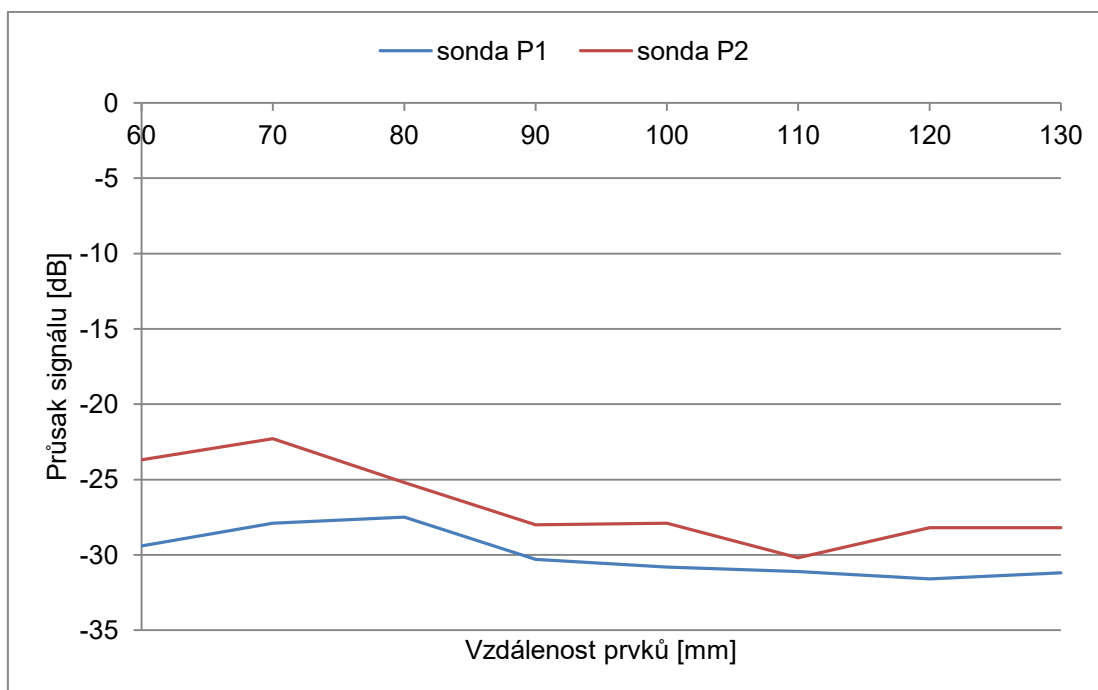
Uspořádání vertikální, horizontální a vertikální.

Následovalo měření průsaku signálu pro uspořádání vertikální se středovým prvkem pootočeným o 90° do horizontální polarizace.

L [mm]	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
P1 [dB]	0	0	-29,4	-27,9	-27,5	-30,3	-30,8	-31,1	-31,6	-31,2
P2 [dB]	0	0	-23,7	-22,3	-25,2	-28	-27,9	-30,2	-28,2	-28,2

Tabulka 13 Naměřené hodnoty průsaku signálu pro uspořádání V+H+V

Na Obrázek 67 zobrazen průběh hodnot z tabulky.



Obrázek 67 Průsak signálu pro uspořádání V+H+V

Průsak signálu při otočení prostředního prvku o 90° nám ukazuje pokles naměřené hodnoty na sondě P1 dokonce i vůči sondě P2. Data vzhledem k mechanickým rozměrům jsou změřena až od vzájemné vzdálenosti prvků 60mm a více. Měření potlačení signálu potvrzují i hodnoty naměřeného odstupů signálu při opačné polarizaci prováděné ve VUS n.o.

Vertikální polarizace a natočený středový a krajní prvek

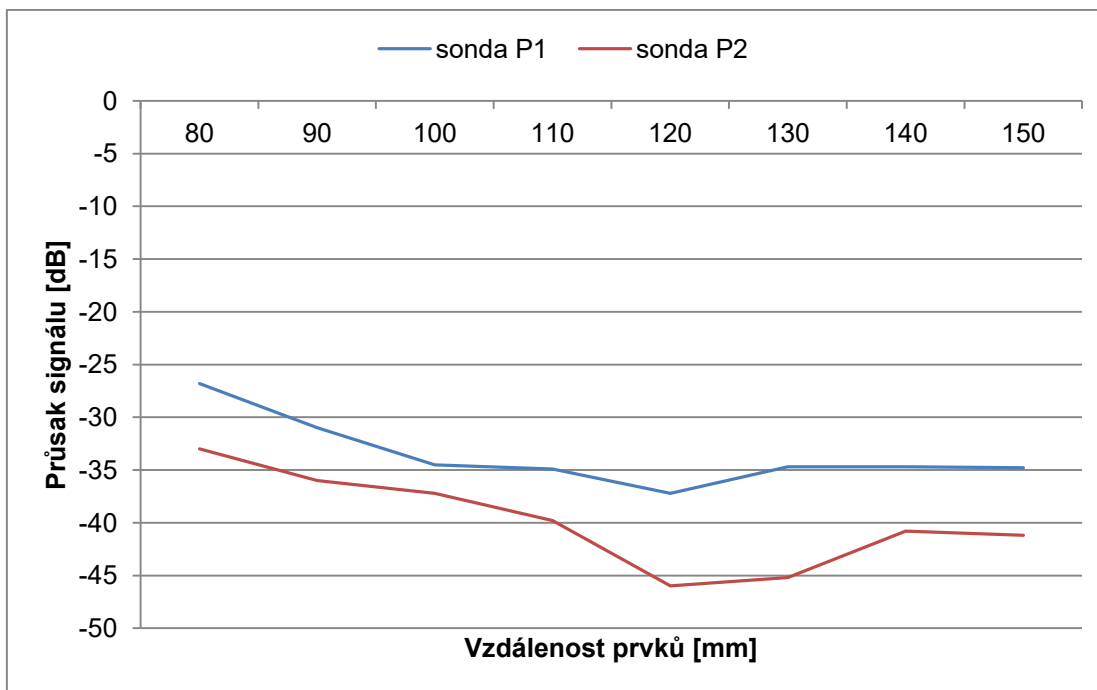
Poslední měření pro zjišťování hodnot průsaku signálu probíhalo v konfiguraci antén Vertikální polarizace plus vzájemné pootočení prvků o 45° s umístěním středových prvků v ose.

Tabulka naměřených hodnot č. Tabulka 14 je společně s obrázkem Obrázek 68 níže.

L [mm]	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150
P1 [dB]	0	0	-26,8	-31	-37,2	-34,9	-34,7	-34,7	-35,2	-34,8
P2 [dB]	0	0	-33	-36	-37,2	-39,8	-46	-45,2	-40,8	-41,2

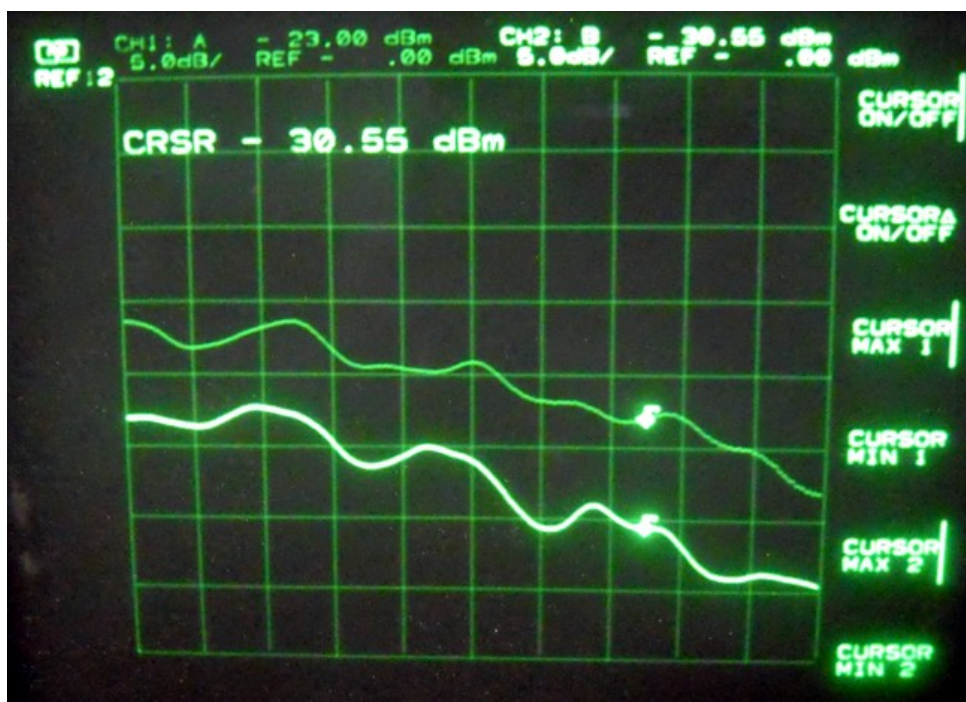
Tabulka 14 Naměřené hodnoty průsaku signálu pro uspořádání V+45-45

Hodnoty byly vzhledem k mechanickým rozměrům zjišťovány až od vzájemné vzdálenosti prvků 80mm.



Obrázek 68 Průsak signálu pro uspořádání V+45°-45°

Na obrázku 68 vidíme pokles ve vzdálenosti odpovídající dvojnásobku vlnové délky. Na obrázku Obrázek 69 je frekvenčně závislý průběh průsaku do vedlejšího flíčku 2 (světlejší čára) a průsak do flíčku 3 – tmavší čára. Je jasné patrné, že sonda umístěná v 3 flíčku je již za hranicí citlivosti měřicího přístroje, což jsem vzhledem k výsledkům simulace a dynamickému rozsahu měřicího přístroje očekával.

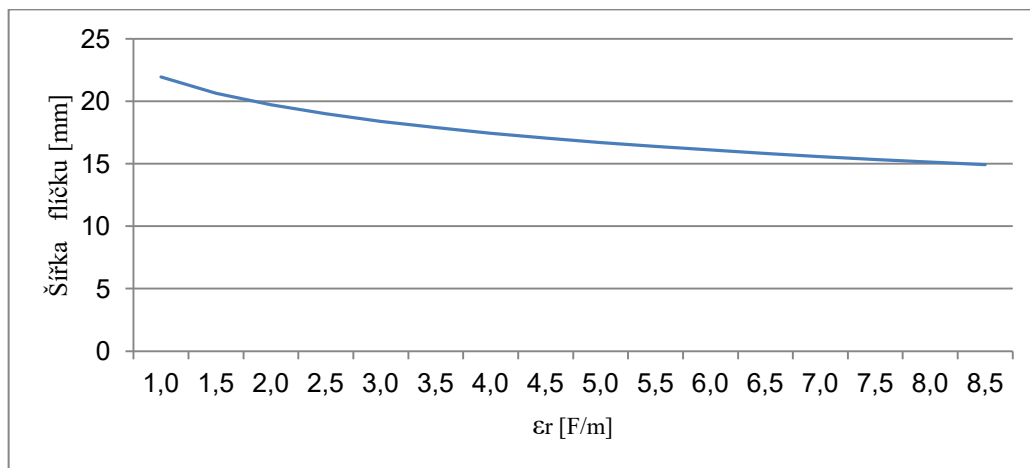


Obrázek 69 Frekvenční závislost průsaku signálu do sousedního flíčku

Tímto můžeme považovat bod 5 zadání práce za splněný.

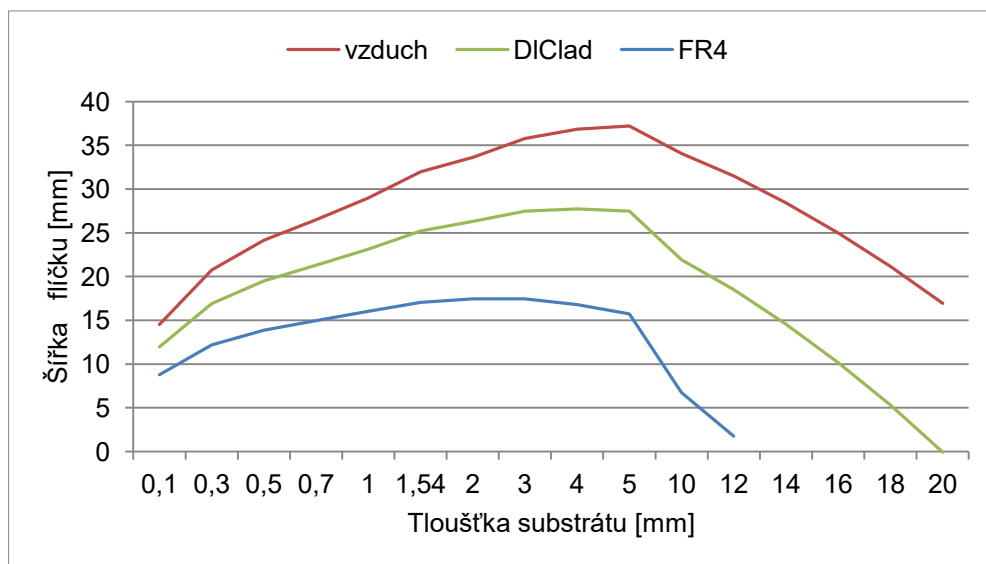
7. VLIV SUBSTRÁTU NA VLASTNOSTI ANTÉNY

Mezi základní vlastnosti substrátů patří relativní permitivita ϵ_r a činitel dielektrických ztrát $\tan \delta$ a jejich teplotní a frekvenční stálost. Teplotní a frekvenční stálost je zaručena technologií výroby. Jak je patrné z obrázku Obrázek 70, s rostoucí permitivitou se šířka flíčku zmenšuje. Výpočet jsem prováděl pro substrát FR4.



Obrázek 70 Závislost šířky flíčku na ϵ_r

Rozměry flíčku také významně ovlivňuje použitý materiál a jeho permitivita. Níže je uveden obrázek Obrázek 71 závislosti šířky flíčku na tloušťce substrátu pro různé materiály. Mnou používaný FR4, pro vzduch i pro materiál DICIad – speciální materiál určený pro vysokofrekvenční aplikace.



Obrázek 71 Závislost šířky flíčku na tloušťce substrátu

Z výše uvedených obrázků a výpočtů můžeme prohlásit, že tlustší substrát spolu s nižší relativní permitivitou dosahuje větší šířky pásma antény, avšak zároveň je dojde ke snížení zisku. Grafy vznikly vizualizací vzorců dle [17]. Tímto lze považovat bod 6 za splněný.

8. MĚŘENÍ VLIVU TEPLoty NA S₁₁

Materiály používané pro fličkové antény se vyznačují stálými vlastnostmi v rozsahu pracovních teplot. Z výpočtů prováděných dle plyne, že na rozměry antény má vliv frekvence a relativní permitivita prostředí. Protože, jak jsem zmiňoval výše, jsou materiály pro RF struktury stabilní, nedochází ke kolísání parametrů se změnou teploty. V tabulce Tabulka 15 je uveden vliv změny teploty na S₁₁. Vidíme, že s teplotou se hodnoty nijak výrazně nemění, uvedené odchylky mohou být způsobeny nepřesností měření.

t[°C]	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60
S ₁₁ [dB]	-9,9	-9,2	-10,11	-9,7	-10,01	-10,33	-9,6	-9,5	-10

Tabulka 15 Naměřené hodnoty závislost S₁₁ na teplotě

Měření probíhalo v naší firemní laboratoři, substrát byl chlazen na teplotu -20°C a posléze postupně rozehríván až k teplotě plus 60°C. Při měření jsme nezaznamenali výrazné odchylky související se změnou teploty. V reálném provozu je však nutno zamezit případné kondenzaci par a následnému vzniku námrazy na substrátu. Problematikou se podrobně zabývá [35] ve svém textu zaměřeném na vlastnosti antén navrhovaných na textilním substrátu, který je náchylný na pohlcování vzdušné vlhkosti a tím na změnu permitivity. Měření probíhalo na frekvenci 5,6GHz a zjištěné hodnoty jsou v souladu s hodnotami naměřenými ve VUS. Chybu měření odhaduji na ±3 dB. Tímto lze považovat cíl 7 za splněný.

9. ZÁVĚR

V této práci jsem navrhnul a zkonstruoval planární mikropáskovou anténu se ziskem 4-12 dB na substrátu FR4 s využitím základního obdélníkového obrazce flíčku a uspořádal ji vhodně pro kombinaci MIMO 3x3 k dosažení maximální přenosové kapacity až 450Mbit/s. Simulací jsem zjistil optimální vzdálenosti flíčků a našel jsem oblasti rezonance pro danou frekvenci 5,6GHz.

Analyticky jsem ručně vypočetl předběžný tvar antény pro dané dielektrické hodnoty substrátu z katalogového listu. Odchylka rozměrů ručně počítané antény od simulované antény vznikla zjednodušením výpočtu a zaokrouhlováním. U takto vysoké frekvence má odchylka o 0,5mm podstatný vliv na parametry antény.

Z dostupných možností jsem vybral 3 optimalizační metody a jejich algoritmy pro optimalizaci tvaru flíčku a pro získání dat a závislostí vzdálenosti prvků a parametru S_{11} a průsaku signálu do vedlejšího prvku. Používal jsem metody Monte Carlo, Nelder-Mead, Coordinate search, kde u metody Nelder Mead jsem se zabýval i vlivem nastavení optimalizačních podmínek na výpočet. Každá z uvedených metod má svá pozitiva i negativa. V jednotlivých optimalizacích a v teoretické části popisují výhody a nevýhody metod. Optimalizaci jsem prováděl pro hodnotu S_{11} a pro hodnotu intenzity pole v předem definovaném bodě. Při výpočtech jsem experimentálně zjistil, ověřil a následně aplikoval nutnost provádět optimalizaci pro více parametrů, nežli pro zadané 2, protože mezi rozměry antény existuje přímá závislost a optimálních hodnot zvolených parametrů jsem dosáhl postupnou optimalizací všech rozměrů. Při výpočtu se mi postupnou změnou optimalizačních parametrů a vyhodnocováním průběžných výsledků změnil původní tvar z vnořeného napájecího flíčku – napájení se zářezů do substrátu na tvar bez zářezů s napájecím výstupkem.

Jako nejvhodnější uspořádání výsledného designu jsem zvolil antény pootočené o 45° vůči sobě, protože průsak signálu do sousedních prvků byl mnohem nižší, nežli u souhlasného uspořádání.

Konečné uspořádání polarizací pro co největší potlačení signálu tedy doporučuji pro řazení pod sebou následující. Jeden prvek jako vertikální, druhý pootočený o 45° a třetí prvek v horizontální polarizaci.

Zároveň jsem si ověřil, že průsak do okolních prvků je frekvenčně závislý, viz Obrázek 69.

Z hlediska hodnocení rozestupu mezi flíčky jsem dospěl pro konstrukční řešení dle obrázku Obrázek 24 ke vzdálenosti odpovídající alespoň 24mm, protože v daném okamžiku gradient poklesu průsaku signálu do sousedního prvku vykazuje největší změnu - pokles. Jak je patrné z obrázků je nutno při návrhu antény respektovat lokální maxima průsaku signálu způsobených rezonancí sousedního prvku.

Při základní optimalizaci 2 flíčků jsem zjistil, že při rozteči 26,5mm jsou nejlepší hodnoty přizpůsobení antény a zároveň v této vzdálenosti je největší pokles průsaku signálu do sousedního flíčku.

Minimálního průsaku do sousedního flíčku dosáhneme ve vzdálenosti středů 47,75mm, pak při zvětšování dochází vlivem rezonance opět k mírnému nárůstu a následnému dalšímu poklesu.

V uspořádání 3x3 největšího průsaku dosáhneme při umístění ve vzdálenosti středů 59,56mm.

Blokové uspořádání antén.

Obrázek 57 a Obrázek 58 znázorňuje, že pokud umístíme středy prvků této antény od sebe minimálně na vzdálenost dvojnásobku vlnové délky, k ovlivnění již příliš nedojde.

Minimum průsaků do sousedních flíčků jsme zjistili při natočení středového bloku o $1,23\text{rad}$ což odpovídá přibližně 71° . Původní předpoklad natočení o 45° je ovlivněn nesymetrickou konstrukcí antény, která při simulaci a natočení zároveň vykazovala posuv v ose y . V laboratoři jsme ověřili, že průsak je nejmenší při rovnoměrném natočení o 45° . Z těchto zjištění vyplývá závěr, že optimální úhel natočení bude závislý na konkrétním designu antény.

Základní parametry vyrobené antény jsem změřil ve své laboratoři, ve venkovním prostředí na skalárním analyzátoru a ve VUS n.o. Banská Bystrica. Měření dává dostatečný přehled o průběhu naměřených hodnot a chování antény. Při vyhodnocování měřených hodnot jsem kladl důraz na co nejpresnější zjištění změn hodnot závislých proměnných před absolutní přesností hodnot.

Použitý substrát FR4 není primárně určen pro vysokofrekvenční aplikace, avšak vzhledem ke svému hojnému rozšíření a levné výrobě je velmi výhodné jej používat pro výrobu antén v případech, kde rozměry a drobné nepřesnosti nehrají významnou roli.

Vliv teploty na změnu přizpůsobení antény lze v běžných pracovních podmínkách zanedbat. Teplota by ovlivňovala přizpůsobení antény pouze tehdy, pokud by se změnou teploty docházelo ke změně relativní permitivity substrátu.

Závěrem lze na základě praktických testů se zařízeními Mikrotik uvést, že při zvolení konstrukce 3x3 s vhodným nastavením rádiové karty lze dosáhnout ve venkovním prostředí města Ostravy modulační rychlosti 450Mbit/s s reálnou přenosovou kapacitou přes 280Mbit/s v pásmu 5,5-5,7GHz. Celá přenosová soustava je však velmi náchylná k zarušení cizími vysílači a poté dochází k razantnímu poklesu propustnosti. Proto výše uvedené řešení lze doporučit pouze do odlehlejších oblastí, kde může provozovatel lépe optimalizovat celou soustavu.

Rozdíly mezi optimalizací v programech Comsol Multiphysics a CST studio. CST studio nám nabízí pouze základní možnosti nastavení optimalizace, což umožňuje velmi rychlý výpočet. Bohužel však bez jakýchkoliv možností kontroly vlastního procesu a bez možnosti případného zásahu do simulace. Comsol Multiphysics nám nabízí komplexní kontrolu nad vlastním modelováním a simulací. Doba výpočtu je však několikanásobně delší, nežli u CST Studio. Comsol nemá implementovanou v současnosti oblíbenou a hojně používanou metodu PSO. Výsledky získané simulací jednotlivými programy se však příliš neliší. Moduly Optimalizace a RF programu Comsol Multiphysics lze při dobrém pochopení metody výpočtu použít k návrhu antény a k optimalizacím vysokofrekvenčních struktur.

Použité optimalizační metody a postupy lze po mírné modifikaci používat pro jakékoliv frekvence a typy antén. Vždy je však nutno zohlednit správné nastavení výpočetních mezí MESHe a zejména nastavení penalty, Lagrangiánu a parametrů pro výpočet optimalizace.

10.LITERATURA

- [1] JIROUS, Jan. Parabolická anténa JRC-24 MIMO. In: *Www.jirous.com* [online]. Praha, 2016 [cit. 2016-12-29]. Dostupné z: http://cz.jirous.com/anteny-5ghz-parabola/jrc-24_mimo
- [2] MALLAHZADEH, Ali, Sabikeh ES'HAGHI a Amir ALIPOUR. DESIGN OF AN E-SHAPED MIMO ANTENNA USING IWO ALGORITHM FOR WIRELESS APPLICATION AT 5.8 GHZ. *Progress In Electromagnetics Research* [online]. 2009, **90**, 187-203 [cit. 2016-12-29]. DOI: 10.2528/PIER08122704. ISSN 15598985. Dostupné z: <http://www.jpier.org/PIER/pier.php?paper=08122704>
- [3] KARODE, S.L. Dual polarised microstrip patch antenna using feedforward isolation enhancement for simultaneous transmit/receive applications. In: *IEE National Conference on Antennas and Propagation* [online]. IEE, 1999, s. 49-52 [cit. 2016-12-29]. DOI: 10.1049/cp:19990013. ISBN 0852967136. Dostupné z: http://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp_19990013
- [4] KA MING, Mak, Lai HAU WAH a Luk KWAI MAN. *A compact four-port patch antenna for MIMO application*. 2015 9th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP): IEEE, 2015. ISBN 978-8-8907-0185-6. ISSN 2164-3342.
- [5] Všeobecné oprávnění č. VO-R/10/05.2014-3 k využívání rádiových kmitočtů a k provozování zařízení krátkého dosahu: VO-R/10/05.2014-3. *Www.ctu.cz* [online]. 2014 [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: https://www.ctu.cz/cs/download/vseobecna-opravneni/archiv/vo-r_10-04_2012-07.pdf
- [6] Všeobecné oprávnění č. VO-R/10/04.2012-7. In: *Www.ctu.cz* [online]. b.r. [cit. 2015-04-17]. Dostupné z: https://www.ctu.cz/cs/download/oop/rok_2010/vo-r_12-09_2010-12.pdf
- [7] *Optimization with COMSOL Multiphysics: COMSOL Tokyo Conference 2014* [online]. In: FREI, Walter. b.r. [cit. 2015-04-17]. Dostupné z: https://www.kesco.co.jp/conference/2014/data/ConfTokyo2014Mini_Optimization.pdf
- [8] VÍTEČKOVÁ, Miluše a David JEDLIČKA. STATICKÁ OPTIMALIZACE SYSTÉMŮ. In: *Statická optimalizace* [online]. Ostrava: VŠB-TU Ostrava - katedra ATR, 2003 [cit. 2015-04-17]. Dostupné z: <http://books.fs.vsb.cz/StatickaOptimalizace/>
- [9] UOBYQA: unconstrained optimization quadratic aprox.. *CiteSeerX* [online]. b.r. [cit. 2015-04-17]. Dostupné z: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.28.1756&rep=rep1&type=pdf>
- [10] OLUFSON, Mette. Fminsearch uses Nelder Mead. In: *North Carolina State University* [online]. Department of Mathematics, b.r. [cit. 2015-04-17]. Dostupné z: <http://www4.ncsu.edu/~msolufse/>
- [11] MAŇAS, Miroslav. *Optimalizační metody*. Vyd. 1. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1979. Řada teoretické literatury.
- [12] LAGARIAS, Jeffrey, James REEDS, Margaret WRIGHT a Paul WRIGHT Convergence Properties of the Nelder--Mead Simplex Method in Low Dimensions. *SIAM Journal on Optimization* [online]. 1998, **9**(1), 112-147 [cit. 2016-12-04]. DOI: 10.1137/S1052623496303470. ISSN 1052-6234. Dostupné z: <http://epubs.siam.org/doi/abs/10.1137/S1052623496303470>
- [13] NELDER, J. a R. MEAD A Simplex Method for Function Minimization. *The Computer*

- Journal* [online]. 1965, 7(4), 308-313 [cit. 2016-12-04]. DOI: 10.1093/comjnl/7.4.308. ISSN 00104620. Dostupné z: <http://comjnl.oxfordjournals.org/cgi/doi/10.1093/comjnl/7.4.308>
- [14] GAO, Fuchang a Lixing HAN. Implementing the Nelder-Mead simplex algorithm with adaptive parameters. *Computational Optimization and Applications* [online]. 2012, 51(1), 259-277 [cit. 2016-12-04]. DOI: 10.1007/s10589-010-9329-3. ISSN 09266003. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s10589-010-9329-3>
- [15] Optimization for Enhanced Thermal Technology CAD Purposes: Coordinate Search Algorithm. In: *D I S S E R T A T I O N Optimization for Enhanced Thermal Technology CAD Purposes* [online]. wIEN, 2007 [cit. 2015-04-17]. Dostupné z: <http://www.iue.tuwien.ac.at/phd/holzer/node59.html>
- [16] DIAZ, Leo a Thomas MILLIGAN. *Antenna engineering using physical optics: practical CAD techniques and software*. Boston: Artech House, 1996, xiii, 343 p. ISBN 08-900-6732-5.
- [17] RAIDA, Zbyněk. *Počítačové řešení komunikačních systémů*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2004.
- [18] GARG, Ramesh. *Microstrip antenna design handbook*. Boston, MA: Artech House, 2001, xxv, 845 p. ISBN 08-900-6513-6.
- [19] BALANIS, Constantine. *Antenna theory: analysis and design*. 3rd ed. Hoboken, NJ: John Wiley, 2005, xvii, 1117 p. ISBN 04-716-6782-X.
- [20] PCB Laminate Material Information. *EPEC - FR4* [online]. b.r. [cit. 2016-04-17]. Dostupné z: <http://www.epectec.com/pcb/laminate/>
- [21] Elektromagnetické vlny, Mikrovlnná technika. In: *Elektromagnetické vlny* [online]. Brno, b.r. [cit. 2015-04-17]. Dostupné z: <http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/index.php>
- [22] MILLIGAN, Thomas. *Modern antenna design*. 2nd ed. Hoboken, N.J.: Wiley-Interscience, 2005, xvi, 614 p. ISBN 04-714-5776-0.
- [23] HUANG, Yi. a Kevin. BOYLE. *Antennas: from theory to practice*. Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd., 2008. ISBN 9780470510285.
- [24] *Vícepásmová fličková anténa Multi-band spot antenna: Číslo přihlášky: 2005-816*. b.r.. Praha Úřad průmyslového vlastnictví 2008. Přihlášeno 20051227. Uděleno 20081112.
- [25] POZAR, David a D SCHAUBERT. *Microstrip antennas: the analysis and design of microstrip antennas and arrays*. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1995, x, 431 p. ISBN 07-803-1078-0.
- [26] DOSTÁL, Zdeněk a Petr BEREMLIJSKI. *Metody optimalizace* [online]. b.r., , 76 [cit. 2016-12-11]. Dostupné z: <http://mi21.vsb.cz/modul/metody-optimalizace>
- [27] ZÁHLAVA, Vít. *Návrh a konstrukce desek plošných spojů: principy a pravidla praktického návrhu*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2010. ISBN 9788073002664.
- [28] LUERSEN, M.A., R. LE RICHE a F. GUYON A constrained, globalized, and bounded Nelder-Mead method for engineering optimization. *Structural and Multidisciplinary Optimization* [online]. 2004, 27(1-2), 43-54 [cit. 2016-12-08]. DOI: 10.1007/s00158-003-0320-9. ISSN 1615147x. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s00158-003-0320-9>

- [29] BANCROFT, Randy. *Microstrip and printed antenna design*. 2nd ed. Raleigh, NC: SciTech Pub., 2009, xiv, 287 p. ISBN 18-911-2173-1.
- [30] VYHLÁŠKA Ministerstva průmyslu a obchodu ze dne 14. července 2000, [online]. In: . 2004 [cit. 2015-04-17]. Dostupné z: www.unmz.cz/cz/4/264_00_mpo.pdf
- [31] SUDHAKAR RAO, B, Lotfollah SHAFI, Satish SHARMA, Vicki KANE a Michael ALIAMUS. *Handbook of reflector antennas and feed systems: Theory and design of reflectors*. Boston, Massachusetts: Artech House, 2013, 1 online zdroj (323 pages). ISBN 978-1-60807-516-4.
- [32] *Analysis Based on Inset and Transformer feed Microstrip Patch Antennas* [online]. 2006, **2006**(020206-) [cit. 2015-04-17]. ISSN 2347-6680. Dostupné z: <http://www.piserjournal.org/>
- [33] SUN, Li, Gang OU, Yilong LU a Shusen T. Axial Ratio Bandwidth of a Circularly Polarized Microstrip Antenna. In: *Advancement in Microstrip Antennas with Recent Applications*. InTech, 2013. DOI: 10.5772/54664. ISBN 978-953-51-1019-4. Dostupné také z: <http://www.intechopen.com/books/advancement-in-microstrip-antennas-with-recent-applications/axial-ratio-bandwidth-of-a-circularly-polarized-microstrip-antenna>
- [34] BRUNS, Christian, Pascal LEUCHTMANN a Ruediger VAHLIDIECK. *Analysis and Simulation of a 1-18-GHz broadband double-ridged horn antenna* [online]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2003 [cit. 2016-12-17]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1180393/>
- [35] HERTLEER, C., A. VAN LAERE, H. ROGIER a L. VAN LANGENHOVE Influence of Relative Humidity on Textile Antenna Performance. *Textile Research Journal* [online]. 2009, **80**(2), 177-183 [cit. 2016-11-27]. DOI: 10.1177/0040517509105696. ISSN 00405175. Dostupné z: <http://trj.sagepub.com/cgi/doi/10.1177/0040517509105696>

11. PUBLIKAČNÍ ČINNOST

[36] Wezranowski, L., Urban, Z., Ivanek, L.: Horn Antenna with a Specific Radiation Pattern, International Journal of Computer Science and Mobile Computing, Vol.5 Issue.12, December- 2016, pg. 13-18, ISSN 2320–088X.

[37] Wezranowski, L., Orsag, P., Ivanek, L.: Adapting Antenna and Cable to the Signal Processing Circuits, International Journal of Computer Science and Mobile Computing, Vol. 5, Issue. 11, November 2016, pg.128 – 132.

[38] Wezranowski, L., Ivanek, L.: Computing distance between patches of antenna by Comsol Multiphysics using the Nelder-Mead optimization. International Journal of Engineering and Management Invention, Volume 01 Issue 04, december 2016, ISSN (Online): 2455-4786.

[39] Wezranowski, L., Ivanek, L.: Using the Nelder-Mead Optimization Method from the Comsol Multiphysics Program to Calculate the Patch Antenna, International Journal of Computer Science and Mobile Computing, Vol.5 Issue.11, November- 2016, pg. 16-20, ISSN 2320–088X.

[40] Urban, Z., Wežranowski, L., Ivánek, L.: Common Issues with Simulation of Antenna Systems in COMSOL Multiphysics, WOFEX 2016 proceedings of the 14th annual workshop, Ostrava 2016, pp. 509 – 514, ISBN 978-80-248-3961-5.

[41] Wezranowski, L., Urban, Z., Ivanek, L., Zakaria, Y.: Patch antenna optimization in COMSOL multiphysics, ELEKTRO 2016 - 11th International Conference, Proceedings, 13 July 2016, Article number 7512045, Pages 104-109, **ISBN:** 978-146738698-2, **DOI:** 10.1109/ELEKTRO.2016.7512045

[42] Wežranowski, L., Ivánek, L., Urban, Z., Zakaria, Y.: Optimization of antenna system for MIMO technology, Advances in Intelligent Systems and Computing, Volume 451, 2016, Pages 459-469, 1st International Scientific Conference on Intelligent Information Technologies for Industry, IITI 2016; Sochi; Russian Federation; 16 May 2016 through 21 May 2016; Code 175209, **ISSN:** 21945357 **ISBN:** 978-331933815-6, **DOI:** 10.1007/978-3-319-33816-3_45

[43] Wežranowski, L., Kolosov, D., Ivánek, L.: Stray Currents near the Underpass Across the Railway Traction, International Journal of Computer Science and Mobile Computing, 4,7, 2015, pp.9-15, ISSN 2320-088X.

[44] Ivanek, L., Phan, T.T.T., Wezranowski, L.: Remote earth in the electrified railway traction, Proceedings of the 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering, EPE 2014; Pages 619-623, Brno; Czech Republic, **ISBN:** 978-147993806-3.

[45] Phan T., T.T., Wežranowski, L., Ivánek, L., Orsag, P.: Electromagnetic interference in railway traction, Conference proceedings: Results and solutions of young R&S for innovation and progress 2013, Ostrava 2013, s. 95-97, ISBN 978-80-248-3292-0.

[46] Ivánek, L., Phan, T.T.T., Orsag, P., Wežranowski, L.: Možnosti zjišťování EMI v drážních systémech na Katedře elektrotechniky, VLII. sešit Katedry elektrotechniky, Ostrava 2013, s. 17 – 20, ISBN 978-80-248-2995-1.

- [47] Wežranowski, L.: Ivánek,L.: Anténa pro technologii 3 x 3 MIMO, VLII. sešit Katedry elektrotechniky, Ostrava 2013, s. 37 – 39, ISBN 978-80-248-2995-1.
- [48] Ivánek,L., Phan, T.,T.,T., Wežranowski, L.: Modeling of multiconductor lines using the transmission-line theory, II. Workshop NETFEI, Ostravice 2013, s. 79- 81, ISBN 978-80-248-3188-6.
- [49] Phan,T.,T.,T, Paulinský,L., Ivánek,L., Wežranowski,L.: Railway Traction as a Complex Transmission System, Železniční trakce jako komplexní přenosový systém, Proceedings of the 13th International Scientific Conference EPE 2012, s. 1009 – 1014, Brno 2012, ISBN 978-80-214-4514-7.
- [50] Ivánek,L., Paleček,J., Wežranowski,L.: Transient Resistance Between the Rail and Neutral Ground, Přejchodový odpor kolejnice – vzdálená země, Proceedings of the 13th International Scientific Conference EPE 2012, s. 1015 – 1018, Brno 2012, ISBN 978-80-214-4514-7.
- [51] Phan,T.,T.,T, Paulinský,L., Ivánek,L., Wežranowski,L.: Railway Traction as a Complex Transmission System, Železniční trakce jako komplexní přenosový systém, Proceedings of the 13th International Scientific Conference EPE 2012, s. 1009 – 1014, Brno 2012, ISBN 978-80-214-4514-7.
- [52] Ivánek,L., Paleček,J., Wežranowski,L.: Transient Resistance Between the Rail and Neutral Ground, Přejchodový odpor kolejnice – vzdálená země, Proceedings of the 13th International Scientific Conference EPE 2012, s. 1015 – 1018, Brno 2012, ISBN 978-80-214-4514-7.
- [53] Wežranovský,L.: Problems of grounding wireless equipment, konference SEKEL, Horní Lomná, 2011, s. 187-189, ISBN 978-80-248-2452-9.
- [54] Wežranowski,L., Phan Thi Thanh Thao: Comparison of transmitting Powers, XLII sešit katedry elektrotechniky, Ostrava 2010, ISBN 978-80-248-2177-1
- [55] Phan,T., Wežranowski,L.,Ivánek,L.: Signal suppression in the opposite polarization in duplex antennas, XLIII. Sešit katedry elektrotechniky, Ostrava, 2010, s. 109 – 112, ISBN 978-80-248-2240-2.

12.PŘÍLOHY

12.1. Příloha č. 1 tabulka hodnot funkce na sondě flíčku 2

Hodnoty spočtené na sondě flíčku 2

L [mm]	Objective [V/m]	L [mm]	Objective [V/m]
0,025	2282,4	0,039534	384,34
0,025	2282,4	0,039563	423,72
0,025691	2102,9	0,039627	408,33
0,027028	1664,5	0,03963	366,33
0,027034	1841,2	0,039878	368,86
0,028217	1337,6	0,041002	365,11
0,028372	1383	0,041395	296,55
0,028495	1236,2	0,043921	243,02
0,029336	1219,9	0,044543	236,55
0,029672	1160,5	0,044608	225,22
0,03218	807,34	0,04695	177,81
0,032213	777,32	0,047686	176,74
0,033506	723,58	0,047756	180,2
0,033537	712,28	0,049418	146,46
0,034335	687,97	0,050029	146,17
0,034698	621,4	0,051942	127,21
0,037052	491,31	0,052197	128,45
0,037125	493,44	0,052214	135,42
0,037178	451,67	0,052346	131,45
0,037525	448,32	0,05269	133,67
0,038208	432,24	0,053256	119,41
0,038448	422,35	0,053292	128,35
0,038975	388,06	0,055486	110,79
0,039304	385,38	0,057438	115,96
0,057596	122,6	0,059667	122,7

12.2. Příloha č. 2 tabulka hodnot funkce na druhé sondě

Data po simulaci vlivu vzdálenosti flíčků na napětí na sondě jiného portu.

L [mm]	Objective [V/m]	L [mm]	Objective [V/m]
0,025	74,944	0,039627	100,98
0,025691	84,629	0,03963	96,707
0,027028	104,3	0,039878	104,13
0,027034	102,63	0,041002	99,333
0,028217	109,26	0,041395	94,159
0,028372	116,89	0,043921	84,742
0,028495	112,01	0,044543	74,613
0,029336	110,45	0,044608	75,649
0,029672	113,08	0,04695	43,312
0,03218	102,79	0,047686	26,914
0,032213	105,27	0,047756	26,426
0,033506	78,035	0,047756	26,426
0,033537	82,498	0,049418	44,734
0,034335	98,872	0,050029	74,346
0,034698	109,59	0,051942	224,1
0,037052	99,48	0,052197	256,71
0,037125	101,97	0,052214	247,66
0,037178	105,79	0,052346	267,34
0,037525	104,07	0,05269	298,86
0,038208	98,58	0,053256	354,54
0,038448	101,76	0,053292	361,07
0,038975	99,168	0,055486	463,92
0,039304	99,81	0,057438	470,28
0,039534	103,1	0,057596	474,15
0,039563	100,2	0,059667	502,99

12.3. Příloha č. 3 tabulka závislosti hodnot sondy na portu 2 a 3 na frekvenci

Hodnoty na napájecích portech ostatních flíčků v závislosti na frekvenci

freq [Hz]	probe (V/m)-Edge Probe 1	probe (V/m)-Edge Probe 2
5,30E+09	141,87	572,53
5,31E+09	140,13	591,09
5,32E+09	137,38	602,46
5,33E+09	133,86	607,21
5,34E+09	129,79	606,72
5,35E+09	125,33	602,58
5,36E+09	120,61	596,18
5,37E+09	115,65	588,64
5,38E+09	110,39	580,71
5,39E+09	104,66	572,82
5,40E+09	98,188	565,08
5,41E+09	90,533	557,33
5,42E+09	81,055	549,12
5,43E+09	68,881	539,73
5,44E+09	53,241	528,36
5,45E+09	36,967	515,08
5,46E+09	43,383	503,6
5,47E+09	81,633	504,28
5,48E+09	118,68	521,75
5,49E+09	137	537,19
5,50E+09	137,75	534,85
5,51E+09	128,69	516,5
5,52E+09	115,65	488,17
5,53E+09	101,44	454,46
5,54E+09	87,375	418,53
5,55E+09	74,104	382,57
5,56E+09	61,961	348,07
5,57E+09	51,108	315,93
5,58E+09	41,617	286,62
5,59E+09	33,559	260,31
5,60E+09	27,082	236,94
5,61E+09	22,487	216,39
5,62E+09	21,594	198,45
5,63E+09	23,306	182,93
5,64E+09	26,654	169,64
5,65E+09	31,013	158,43

5,66E+09	36,049	149,21
5,67E+09	41,656	141,93
5,68E+09	47,871	136,62
5,69E+09	54,842	133,42
5,70E+09	62,826	132,6

Vyzařovací charakteristika změřená.

[°]	Vertikální rovina [dB]	Horizontální rovina [dB]
0	8,5	8,3
5	7,5	3
10	3	0
15	-5	-5,7
20	-16	-13
25	-8	-9
30	-7	-6
35	-1	-5
40	0	-3,8
45	-0,5	-3
50	-1	-3,6
55	-1	-4
60	-0,5	-5,7
65	-1	-6,7
70	-1	-8,8
75	-2,5	-9,8
80	-3	-12,8
85	-4	-14,7
90	-18,3	-16,5
95	-16	-14,4
100	-15,3	-14
105	-14	-11
110	-12,8	-15,8
115	-17	-16,2
120	-18	-16
125	-30	-17,3
130	-20	-18
135	-15	-21
140	-18	-19
145	-11	-26
150	-14	-14
155	-16	-14
160	-19	-14
165	-15	-16
170	-21	-25
175	-26	-32
180	-20	-18
185	-16	-17,2
190	-13,5	-14,5
195	-13	-33
200	-16	-27

205	-32	-37
210	-20	-17
215	-14	-17
220	-11,5	-6,5
225	-10	-3,5
230	-8	-2,7
235	-18	-7
240	-11	-15
245	-5	-3,2
250	-7	-1
255	-11	-5
260	-17	-10
265	-27	-3
270	-11	-2,8
275	-7	-2,7
280	-5	-5,3
285	-2	-7,5
290	-1	-9,1
295	-2	-1
300	-3	-1,2
305	-1	-1,1
310	-1	-1
315	-1	0
320	-2	2
325	-5	2,1
330	-9	1,8
335	-14	0
340	-5	-11
345	3	-9
350	7	1
355	8,5	7

12.4. FR-4 katalogové údaje

Acculam® Epoxyglas G10/ FR4

Acculam® Epoxyglas G10/ FR4

Product Data Sheet

Product Description

Acculam® Epoxyglas G10/ FR4, is a laminate sheet comprised of a flame retardant epoxy resin and a woven fiberglass substrate. This grade qualifies to NEMA FR4 and MIL-I-24768/27.

Typical Applications

This material has high mechanical strength and excellent electrical insulating qualities in both dry and humid conditions. These attributes along with good fabricating characteristics allow this grade to be used in a wide variety of electrical and mechanical applications.

Typical Properties

Physical Data

	<u>Typical Value</u>	<u>Units</u>
Specific Gravity/Density	1.85	g/cm ³
Water Absorption -.125"	< .10	%
Temperature Index	140 \ 284	°C \ °F
Rockwell Hardness	110	M scale
Bond Strength	> 2,200 \ 1,000	lbs \ kgs
Flexural Strength-LW-A-.125"	> 65,000 \ 448	PSI \ MPa
Flexural Strength-CW-A-.125"	> 50,000 \ 345	PSI \ MPa
Izod Impact Strength-LW	> 10	ft-lbs/in
Izod Impact Strength-CW	> 8	ft-lbs/in
Compressive Strength-Flatwise	> 60,000 \ 415	PSI \ MPa

Electrical Data

Dielectric Breakdown-A	> 50	kV
Dielectric Breakdown-D48/50	> 50	kV
Permittivity-A	4.8	
Permativity-D24/23	4.8	
Dissipation Factor-A	0.017	
Dissipation Factor-D24/23	0.018	

Accurate provides this data as information only and does not imply any warranty for its use or application.

13.CURRICULUM VITAE

Ing. Lukáš Wežranowski

Datum narození: 31.7.1972

Místo narození: Ostrava

Bydliště: Staroveská 274, Brušperk

Zaměstnání:

Od roku 2006 - SEWECOM ONLINE s.r.o, majitel

Společnost se zaměřuje na dovoz síťových komponent ze zahraničí a následnou distribuci.

V ČR a SR zastupuje polského výrobce bezdrátových komponent Cyberbajt. Firma je vybavena vlastní měřicí stanicí pro základní testování bezdrátových zařízení do frekvence 18GHz.

Od roku 2006 postupně buduje a rozvíjí servisní středisko taiwanského výrobce bezdrátových a kamerových systému Ovislink – Airlive. V současnosti provádějí komplexní servis produktů této značky pro ČR, SR, PL, HU a okolí.

Má vlastní výrobky ze sortimentu RF techniky, jako například kabely, redukce, antény a podobné, které vznikly na základě vlastního návrhu.

Provozuje vlastní bezdrátovou síť.

V letech 2015 a 2016 pracoval jako technický konzultant pro společnost Canon a měl na starosti kompletní technickou podporu zákazníků firmy v ČR a SR pro oblast IP kamerových systémů a NVS.

2000-2006 – SEWECOM s.r.o, majitel

Společnost zaměřená na vývoj a výrobu audio techniky pro profesionální použití. Spolutvůrce několika konstrukcí NF zesilovačů a doplňků. Stavebnice se používaly na elektrotechnických školách.

Vzdělání:

2009 - doposud – v kombinované formě studuje doktorské studium na katedře Telekomunikační techniky VŠB, školitel doc. Ing. Ivánek Lubomír, CSc.

2006 - 2008 – Fakulta elektrotechniky a informatiky VŠB, magisterské studium

2004 – 2006 – Fakulta elektrotechniky a informatiky VŠB, bakalářské studium